



A. Musehold

Allgemeine Akustik und Mechanik des menschlichen Stimmorgans

Mit 19 Photographien des menschlichen Kehlkopfes





Allgemeine Akustik und Mechanik des menschlichen Stimmorgans

Von

Dr. Albert Musehold
Geheimer Sanitätsrat in Berlin

Mit 19 Photographien
des menschlichen Kehlkopfes auf 6 Tafeln
und 53 Abbildungen im Text



Berlin
Verlag von Julius Springer
1913

Vorwort.

Die Aufgaben des Kehlkopf-Arztes haben dadurch eine wesentliche Erweiterung erfahren, daß sich im Rahmen der Laryngologie die Lehre von der Stimme und Sprache zu einer stattlichen Wissenschaft entwickelt hat. Dementsprechend gelten die Heilbestrebungen des Arztes nicht mehr nur den durch grobe pathologisch-anatomische Veränderung bedingten Störungen, sondern auch den feineren funktionellen Vorgängen im Stimmorgan, welche dasselbe als musikalisches Instrument charakterisieren. Für diesen Zweck ist aber vor allem ein eingehendes Verständnis dieses Instrumentes, die richtige Bewertung seiner Teile in bezug auf ihre mechanische und musikalische Leistung erforderlich. — Leider sind diese grundlegenden Kenntnisse noch nicht genügend abgeklärt und demgemäß die Ansichten nicht eindeutig. Diese Tatsache und das Vertrauen der Herrn Kollegen, welche mich nach der Veröffentlichung meiner Arbeit: „Photographische und stroboskopische Studien über die Stellung der Stimmlippen im Brust- und Falsettregister" vielfach über meine Beobachtungen befragten, bewog mich zu der vorstehenden Arbeit. Ich entschloß mich dazu um so lieber, als ich die Absicht hatte, meine mit vieler Mühe zum Teil auf stroboskopischem Wege erreichten und deshalb um so wertvolleren Photographien des lebenden Kehlkopfes einem größeren Kreise zugänglich zu machen. Die duich Photographie und Stroboskopie gefundenen Tatsachen drängen selbstverständlich zum Vergleich des Kehlkopfs mit den vorhandenen musikalischen Blasinstrumenten. Deshalb ist die Physik der letzteren in möglichst vergleichender Weise, aber nur soweit erörtert, als ich zur Erklärung der Vorgänge im menschlichen Stimmorgan für notwendig erachtete.

Dank der freundlichen Bereitwilligkeit der Verlagsbuchhandlung habe ich eine Auswahl meiner Original-Photographien des singenden Kehlkopfs auf 6 Tafeln dieser Arbeit beigeben können, und zwar nicht in dem üblichen Lichtdruck, sondern, um das Charakteristische

der Bilder möglichst zu bewahren, wieder als „Photographie“, deren Vervielfältigung die „Neue photographische Gesellschaft in Steglitz“ in bewährtem Verfahren ausgeführt hat.

Möge das Büchlein mit den Photographien allen denen, welche ihr Interesse den Vorgängen im menschlichen Stimmorgan zuwenden, ein willkommener Leitfaden sein für die Deutung ihrer Beobachtungen und eine Anregung zu weiteren eigenen Untersuchungen.

Berlin, im Oktober 1912.

Dr. A. Musehold.

Inhaltsverzeichnis.

Erstes Kapitel.

Einleitung — Der Ton — Einfache pendelartige oder Sinusschwingungen — Die Schwingungskurve, das mathematische Bild derselben — Der Klang — Mehrfach zusammengesetzte Sinusschwingungen — Harmonische Obertöne — Klanganalyse — Klangfarbe.

Wenn wir in erhabenem Raume die Klänge der Orgel vernehmen mit ihrer gewaltigen, markerschütternden Tiefe, ihrem reichen Wechsel der Klangfarben bis hinauf zu den wie Äolsharfen mild und weich ausklingenden Tönen, so erscheint es fast unglaublich, daß diese ergreifende Musik von nur zwei im Prinzip verschiedenen Instrumenten geleistet wird: von den Flöten- und den Zungenpfeifen. Und doch hat es der Orgelbauer lediglich durch eigene Erfahrung gelernt, mit diesen Pfeifen die Klänge fast sämtlicher musikalischen Instrumente nachzuahmen und in einem wunderbaren Bau zu vereinigen. Ja sogar die menschliche Stimme ist in diesem großartigen Orchester durch das Register vox humana oder vox coelestis vertreten, und sie soll von der Orgel in der Kirche zu Bernau[1]) bei Berlin so trefflich dargestellt werden, daß man bei Benutzung der Töne dieses Registers im Duett einen Bariton- und Tenor-Sänger zu hören glaubt. Diese Tatsache ist um so bemerkenswerter, als das menschliche Stimmorgan, verhältnismäßig einfach in seinem Bau, sowohl durch den Umfang als auch ganz besonders durch den Charakter seiner Töne so Hervorragendes zu leisten vermag, daß der berühmte Physiologe Johannes Müller[2]) dasselbe eine kunstvolle Einrichtung nennt, mit der kein musikalisches Werkzeug zu vergleichen ist.

Solange nämlich die wissenschaftliche Forschung sich mit dem Studium der menschlichen Stimme beschäftigt, so lange hat sich auch das Bedürfnis geltend gemacht, zur Ergründung der physikalischen Vorgänge im Kehlkopf bei der Tonerzeugung die beiden Grundtypen der musikalischen Blasinstrumente: die Flöten- und die Zungenpfeifen, zum Vergleiche heranzuziehen. Bildet doch

[1]) Joh. Jul. Seidel, Die Orgel und ihr Bau, Leipzig 1887, S. 172.
[2]) J. Müller, Physiol. d. Menschen, Bd. 2, S. 219.

hier wie bei der menschlichen Stimme unter einem gewissen Druck bewegte bzw. geblasene Luft die treibende Kraft für die Erzeugung des Tones. Und wenn über die Art und den Ort der Entstehung des Tones selbst lange Zeit Unklarheit herrschte, weil die physikalische Bewertung der hier in Frage kommenden Mechanik auf falschen Voraussetzungen beruhte, so haben die genialen Forscher Ernst Heinrich und Wilh. Weber[1]) auch hierin eine weitere gemeinschaftliche Eigentümlichkeit nachgewiesen. Sowohl in den Blas-Instrumenten wie in dem menschlichen Stimmorgan werden mehr oder weniger eingeschlossene Luftsäulen erschüttert, so daß sie in periodische Schwingungen geraten und damit den Ton geben. Der wesentliche Unterschied besteht nur in der Art, dem Mechanismus, durch welchen die Luftsäulen in Schwankungen versetzt werden und in der durch diesen Mechanismus bedingten Größe, und Form der Luftsäulen. So erfordert bei den Flötenpfeifen jeder Ton eine bestimmte Länge der Pfeife bzw. ein bestimmtes Volumen der Luftsäule, während der die Schwingungen erzeugende Mechanismus unverändert bleiben kann. Bei den Zungenpfeifen erheischt jeder Ton eine andere in ihren Dimensionen bestimmte Zunge, also eine Änderung des tonerzeugenden Mechanismus, während die Länge des über dem letzteren stehenden Rohres, des Ansatzrohres, in bestimmten Grenzen keinen oder nur unwesentlichen Einfluß auf die Höhe des Tones hat. Im Gegensatz hierzu ist das menschliche Stimmorgan so wunderbar eingerichtet, daß der tonerzeugende Mechanismus, die Stimmlippen in ihrer Spannung und ihren Dimensionen willkürlich verändert werden können, um der über ihnen in den oberen Luftwegen befindlichen Luftsäule der Zahl nach so verschiedene Schwingungen zu geben, daß sie die Töne von zwei bis drei Oktaven umfassen. Das Ansatzrohr: der Rachen, die Mund- und Nasenhöhle, bleibt dabei in seiner Länge fast unverändert, die Mundhöhle aber kann dem Willensimpulse folgend ihre Gestalt und damit auch den Rauminhalt wechseln, um den Tönen, oder physikalisch ausgedrückt, den Klängen den der menschlichen Stimme eigentümlichen Charakter zu verleihen.

Die Physik unterscheidet bekanntlich diese beiden Schallqualitäten, den Ton und den Klang, streng voneinander, insofern

---

[1]) E. H. Weber, Wellenlehre, Leipzig 1825, S. 287.

der Ton gewissermaßen die musikalische Einheit darstellt, bei der sich die Luftschwingungen einfach wie beim Hin- und Hergange des Pendels vollziehen. Wenn das Pendel von seinem Ruhepunkte R rechts seitwärts bis a bewegt und dann losgelassen wird, so schwingt es zurück über seinen Ruhepunkt hinaus bis b, d. h. so weit, wie es vorher rechts seitwärts geführt war, und bewegt sich so in allmählich kürzeren Wegen hin und her, bis die ihm gegebene Energie durch die Reibung am Aufhängepunkt und den Widerstand der Luft aufgebraucht ist. Wenn das Pendel aber immer wieder neue Kraft erhält, z. B. durch die Feder eines aufgezogenen Uhrwerks, dann schwingt es dauernd in gleichen Wegen hin und her. Derselbe Vorgang zeigt sich auch bei der schwingenden Stimmgabel und läßt sich leicht von dieser selbst aufzeichnen. Zu diesem Zweck befestigt man auf einer Zinke der-

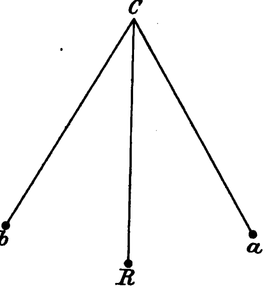


Fig. 1.

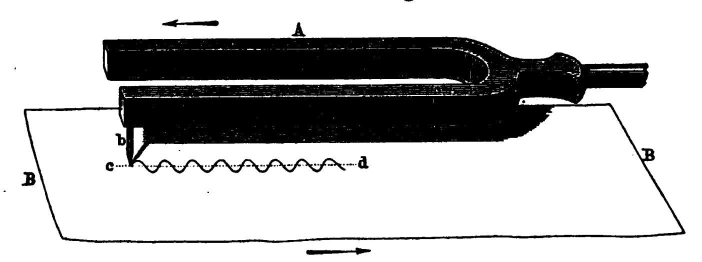


Fig. 2. (Nach Helmholtz.)

selben, senkrecht zu ihrer Schwingungsebene, eine Borste mit Wachs oder einen Zeichenstift b und zieht an demselben während der Schwingung in der Längsrichtung der Gabel eine berußte Glasplatte oder ein Papierblatt B B vorbei. Die schwingende Zinke zeichnet dann je nach der Schnelligkeit, mit welcher die Platte vorbeigezogen wird, eine mehr oder weniger geschlängelte, aber durch den Energieverbrauch immer flacher werdende Linie auf. Benutzt man eine durch einen Elektromagneten in dauernder Schwingung erhaltene Stimmgabel, dann bleibt die Gestalt dieser Linie, der „Schwingungskurve", eine gleichmäßige wie in Fig. 2.

Wir pflegen diese Wellenlinie horizontal zu betrachten und legen zu diesem Zweck in ihrer Längsrichtung durch die Punkte, welche der Ruhestellung der Stimmgabelzinke entsprechen, d. h. durch die Mitte der Wellenhöhe eine gerade Linie: die „Abszissenachse" c d. Dann besteht die Kurve aus abwechselnd über und unter der Abszissenachse liegenden symmetrischen Ausbuchtungen, den Schwingungsbäuchen. Wie eine Wasserwelle aus einem Wellenberg und Wellental zusammengesetzt ist, so entsprechen auch hier zwei entgegengesetzte Schwingungsbäuche einer ganzen Schwingung. Die Höhen der Erhebungen der Kurve über die Abszissenachse beziehungsweise ihrer Senkungen unter dieselbe zeigen die Entfernungen der schwingenden Stimmgabelzinke von ihrer Ruhelage nach innen und außen an. Sie werden gemessen durch senkrecht auf die Abszissenachse gefällte gerade Linien: die „Ordinaten", (Fig. 3). Diese als Ordinaten aufgetragenen Höhen sind in

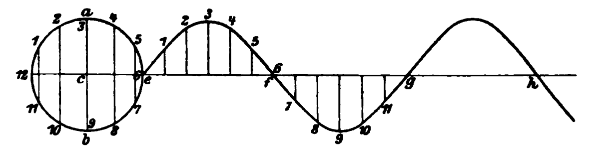


Fig. 3. (Nach Helmholtz.)

jedem Schwingungsbauch symmetrisch, d. h. alle von der Mitte desselben gleich weit entfernten Ordinaten sind gleich hoch. Sie verhalten sich wie die Sinus eines der Zeit proportional, d. h. mit gleichen Abschnitten wachsenden Kreisbogens. Aus diesem Grunde werden Kurven dieser Form Sinuskurven und die ihnen zugrunde liegenden Schwingungen Sinus-Schwingungen genannt. Eine solche Sinuskurve läßt sich ihrer Definition gemäß leicht konstruieren. Man teilt einen Kreis in seine Quadranten und den Kreisbogen eines jeden derselben in eine gleiche Zahl (3) gleich großer Abschnitte. Dann fällt man von den Teilpunkten der letzteren senkrechte Linien — die Sinus-Linien — auf den horizontalen Durchmesser des Kreises. Hierauf trage man diese Sinuslinien der Reihe nach als Ordinaten auf einer Abszissenachse auf. welche in ebenso viel gleiche Abschnitte geteilt ist wie die Peripherie des Kreises, und zwar die positiven Sinus nach oben, die negativen nach unten gerichtet. Die Verbindungslinie der freien Enden dieser Ordinaten stellt die Sinuskurve dar.

Bei der Betrachtung dieser Kurve darf aber nicht vergessen werden, daß die Schallwellen Longitudinal-Schwingungen sind, d. h. solche, wo die Luftteilchen in der Richtung der Fortpflanzung des Schalles schwingen. Sie bestehen aus abwechselnd folgenden Luftverdichtungen und -verdünnungen, welche von der Schallquelle aus strahlenförmig nach allen Richtungen fortschreiten. Bei der Bewegung der Luftteilchen nach vorn entsteht die Verdichtung, beim Rückschwung nach hinten Verdünnung. Demgemäß entsprechen in der obigen wie in allen Schallkurven die Erhebungen derselben beziehungsweise ihre Ordinaten über der Abszissenachse den Bewegungen der Teilchen während der Verdichtung, die unter der Abszissenachse befindlichen bezeichnen dagegen denselben Vorgang während der Luftverdünnung. Die obige Sinuskurve ist also nicht das wirkliche, sondern das mathematische Bild für die Bewegungsrichtung und die Bewegungsbreiten (Amplituden) der schwingenden Teilchen bei einem Ton in physikalischem Sinne des Wortes.

Wesentlich anders gestaltet sich dieses Kurvenbild bei den Klängen. Der Klang ist keine Toneinheit, sondern aus mehreren Tönen zusammengesetzt: seinem vorherrschenden Grundton, der die Höhe des Klanges bestimmt, und einer wechselnden Zahl von Obertönen. Diese harmonischen Obertöne stehen in dem bestimmten Verhältnis zu ihrem Grundton, daß ihre Schwingungszahl das 2-, 3-, 4-, 5- usw. -fache der Schwingungszahl des Grundtons beträgt. Es sind z. B. die Obertöne von C die

Oktave	c	2	fach
Quinte derselben	g	3	,,
2. Oktave	c′	4	,,
Terz	e′	5	,,
Quinte derselben.	g′	6	,,
3. Oktave	c″	8	,,
Sekunde	d″	9	,,
Terz	e″	10	,,
Quinte derselben	g″	12	,, usw.

Dementsprechend setzt sich auch die Schwingungskurve des Klanges aus der des Grundtones und seiner vorhandenen Obertöne zusammen, welche vereinigt ein von der oberen Kurve durchaus verschiedenes, aber charakteristisches Bild geben.

Wie wir oben die einfache Sinuskurve konstruiert haben, so läßt sich auch die aus den verschiedenen Sinuskurven der Teiltöne eines Klanges resultierende Kurve leicht zeichnerisch zur Anschauung bringen. Handelt es sich z. B. um den Grundton und seine Oktave, so würden denselben die Kurven A und B in Fig. 4 entsprechen. Zur Darstellung der resultierenden Kurve zieht man auf beiden Abszissen an gleichen Stellen die Ordinaten, addiert die gleichgerichteten, während die einander entgegengesetzten subtrahiert werden, und trägt diese Summen beziehungsweise Differenzen an denselben Stellen der Abszisse C auf. Die

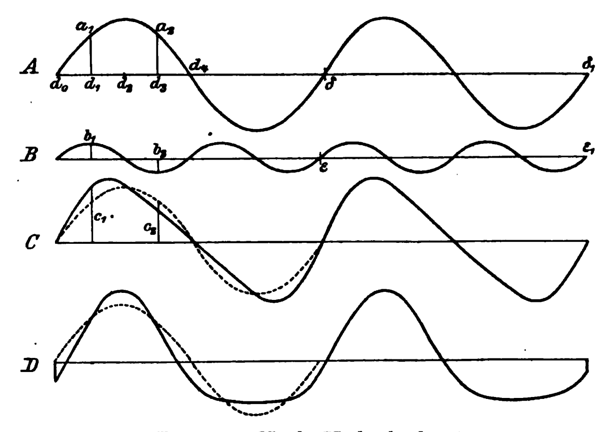


Fig. 4. (Nach Helmholtz.)

Verbindung der freien Enden der Ordinaten gibt die neue zusammengesetzte Kurve. Werden die Kurven A und B durch Änderung der Schwingungsphasen gegeneinander verschoben, so entsteht die Kurve D.

Auf diese Weise könnte auch die durch Hinzufügen noch anderer Obertonkurven entstehende Sammelkurve gezeichnet werden. Umgekehrt aber läßt sich eine solche zusammengesetzte Welle, welche von irgendeinem Schallaufnahme-Apparat gezeichnet ist, durch Messungen und Berechnungen mit Hilfe der sogenannten Fourierschen Formel[1]) in ihre Teilwellen zerlegen.

[1]) Auerbach, Akustik, S. 37. — Herrmann, Synthese d. Vokale. Pflügers Archiv, Bd. 91, 1902. — Gutzmann, Physiol. d. Stimme u. Sprache 1909, S. 97.

Diese Klanganalyse ist eine sehr wertvolle Methode, die Teiltöne, d. h. den Grundton und die vorhandenen Obertöne eines Klanges und besonders der Vokalklänge zu ermitteln. Einfacher jedoch, wenn auch weniger objektiv, zerlegte Helmholtz die Klänge mit Hilfe der Resonanz. Mit einer Reihe von genau abgestimmten, meist kugelförmigen Resonatoren hörte er den dem Eigenton eines Resonators gleichenden Teilton eines Klanges dadurch ab, daß er das eine Ende des Resonators in sein Ohr steckte. Dabei fand er, daß die Zahl und Stärke der Obertöne den musikalischen Klängen der verschiedenen Instrumente den ihnen eigentümlichen Charakter, d. h. die „Klangfarbe" geben. Helmholtz[1]) konnte für diese Klangfarben gewisse Regeln aufstellen, die von der Art des Instrumentes, seiner Form und von der den Ton erzeugenden Mechanik abhängig sind. Deshalb sollen dieselben, soweit sie die hier zu besprechenden Instrumente betreffen, erst im Verlaufe der nun folgenden Beschreibung der Instrumente und der ihnen entsprechenden Vorgänge bei der Tonbildung Erwähnung finden. Während dieser Betrachtungen folgen wir aber zweckmäßig nicht allein den Wegen des Physikers, sondern suchen auch aus den Erfahrungen des Praktikers, des Instrumentenbauers[2]), die mechanischen Vorrichtungen der Instrumente richtig zu deuten und zu bewerten.

Seit langem werden wir gelehrt, daß der menschliche Kehlkopf mit einer Zungenpfeife zu vergleichen sei. Manche Forscher aber fühlten sich veranlaßt, auch die Flötenpfeifen zum Vergleich heranzuziehen. Noch in jüngster Zeit spricht W. Nagel[3]) in seiner Arbeit: „Über Problematisches in der Physiologie der Stimmlippen" von der Möglichkeit, daß im Falsett die Schwingungen der Stimmlippen nicht die Ursache für die Luftschwingungen im Ansatzrohr sind, sondern vielleicht umgekehrt die Folge derselben. „Im letzteren Falle wäre anzunehmen, daß der Kehlkopf im Falsett zunächst als Lippenpfeife angeblasen würde und die verdünnten gespannten Stimmlippenränder nur gewissermaßen passiv zum Mitschwingen kämen." Da solche Fragen nur dann mit Aussicht auf Erfolg erörtert werden können, wenn die

---

[1]) Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, 1896, S. 192.

[2]) J. G. Toepfer, Die Theorie und Praxis des Orgelbaues, Weimar 1888.

[3]) Zentralblatt f. Physiologie 1907, Nr. 23.

Mechanik und Physik der zum Vergleich herangezogenen Instrumente eine gebührende Würdigung erfährt, so sollen hier auch die Flöten- oder Labialpfeifen eine möglichst eingehende Besprechung finden. Außerdem aber halte ich die Kenntnis des Mechanismus gerade der Flötenpfeifen für umso notwendiger, als hier die akustischen Beziehungen des Ansatzrohres zu der tonerzeugenden Mechanik besonders prägnant hervortreten und sich als so charakteristisch für die Flötenpfeifen erweisen, daß sie eine unentbehrliche Grundlage für die Betrachtung der übrigen Blasinstrumente und des menschlichen Kehlkopfes bilden.

Zweites Kapitel.

Die Flötenpfeifen — Physik des Pfeifenkörpers der „offenen" Pfeifen — Stehende Wellen — Knotenpunkte und Zahl derselben bei den harmonischen Obertönen — Die „gedeckten" Pfeifen — Der tonerregende Mechanismus der Flöten — Theorien über die Tonentstehung von Tyndall, Sonreck, van Shaik — Luftverbrauch — Windstärke und Tonhöhe.

Die Flötenpfeifen haben je nach dem Material, aus dem sie gefertigt sind, eine verschiedene Gestalt. Im allgemeinen sind die Holzpfeifen 4seitig-prismatisch, die Metallpfeifen zylindrisch geformt, doch erhalten beide der Erfahrung gemäß zur Erzielung bestimmter Klangfarben auch eine pyramidenförmige bzw. konische Gestalt. In der nebenstehenden Zeichnung (Fig. 5) ist der untere Ansatz der Fuß oder das Windrohr, das den Luftstrom aus der Windlade in den Windkasten K führt. Letzterer ist nach oben begrenzt von dem Kern d, dessen mehr oder weniger scharfer Rand mit dem über ihm liegenden Brettchen f, dem Vorschlag, den Kernspalt c d begrenzt. Der obere Rand des „Vorschlages" f heißt die untere Lippe (labium), welcher oben die von außen nach unten zugeschärfte obere Lippe a b gegenüberliegt. Zwischen a b und f, also der oberen und unteren Lippe, befindet sich eine breite, aber kurze viereckige Öffnung: der „Aufschnitt". Die genannten beiden Lippen haben diesen Pfeifen den Namen Lippen- oder Labial-Pfeifen gegeben. Da aber, wenn von Lippen gesprochen wird, der Gedanke an die Mundlippen, also weiche bewegliche Körper, sehr nahe liegt, so sollte man zur Vermeidung von Verwechslungen statt der obigen Benennung nur die auch von Helmholtz bevorzugte Bezeichnung „Flötenpfeife"

gebrauchen. — Der über dem Kern stehende Teil R der Pfeife bildet den „Pfeifenkörper". Derselbe kann am oberen Ende offen oder mehr oder weniger geschlossen sein. Im ersten Falle ist die Flötenpfeife eine „offene", im anderen eine „gedeckte".

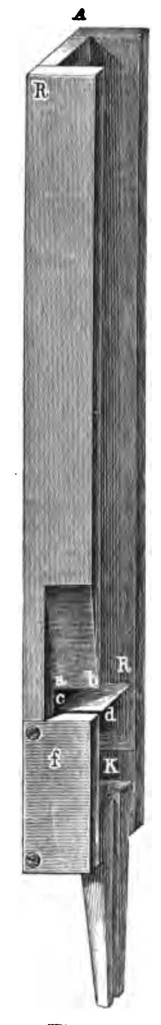


Fig. 5.
(Nach Helmholtz.)

Der Pfeifenkörper enthält die Luftsäule, welche durch Anblasen in Schwingungen versetzt wird und dadurch den Ton gibt. Die Schwingungen im Pfeifenkörper vollziehen sich nach den für offene bzw. an einem Ende geschlossene Resonanzröhren geltenden Gesetzen. — Wenn man quer über das eine Ende einer beiderseits offenen Röhre leicht hinwegbläst, aber so, daß der gegenüberliegende Rand getroffen wird, so macht sich zuerst ein schwirrendes Geräusch und bald ein schwacher Ton, der tiefste „Eigenton" oder „Grundton" der Röhre bemerkbar[1]). Dieser Ton ist der Ausdruck von Luftschwingungen in dem Rohre, welche durch das Anblasen, also durch unregelmäßige Erschütterungen, erregt sind. Dabei finden die Schwingungen der in der Röhre befindlichen Luftsäule in „stehender Welle" statt, d. h. die verschiedenen Luftteilchen schwingen in der Längsrichtung der Röhre gleichzeitig zwar in verschiedener Weite hin und her, aber an derselben Stelle immer in gleichem Maße. In der Mitte der offenen Röhre befindet sich ein „Knotenpunkt" oder richtiger ausgedrückt eine zur Längsrichtung der Röhre quergestellte „Knotenfläche". — Hier ist die Bewegung der Luftteilchen am geringsten, fast = 0. Dagegen findet hier der größte Wechsel von Verdichtung und Verdünnung statt. Von der Knotenfläche aus

[1]) Tyndall, Der Schall, 1897, S. 210.

nimmt die Hin- und Herbewegung der Luftteilchen nach den Enden zu und erreicht dort ihre größte Breite oder „Amplitude". Diese Tatsachen sind experimentell erwiesen. William Hopkins[1]) führte in eine senkrecht aufgestellte offene Flötenpfeife aus Glas (Fig. 6), während sie ihren Grundton gab, einen wagerecht an einem Faden hängenden kleinen Reifen ein, über den ein dünnes Häutchen gespannt war. Dabei zeigte sich am oberen Ende der Röhre ein lautes Schwirren des Häutchens. Je tiefer aber der Reifen in die Röhre eindrang, umso ruhiger wurde das Häutchen, bis es in der Mitte ganz verstummte. In weiterer Tiefe stellte sich das Schwirren wieder ein und hielt bis zum Boden der Pfeife an. Dieses Vibrieren des Häutchens ist der Ausdruck der in der Röhre befindlichen Bewegung der Luftteilchen. An den Enden, wo das Schwirren am lautesten war, muß die Schwingungsbreite der Luftteilchen am größten sein, während die Ruhe des Häutchens in der Mitte der Röhre ein Beweis dafür ist, daß hier am „Knotenpunkte" keine oder nur sehr geringe Bewegung in der Längsrichtung der Röhre stattfindet. Ein Versuch von Tyndall[2]) zeigt andererseits, daß am Knotenpunkt die größte Dichte bzw. der größte Wechsel von Verdichtung und Verdünnung vorhanden ist. In die eine Wand einer prismatischen hölzernen Flötenpfeife sind drei Löcher gebohrt: eins in der Mitte sowie je eines in gleichen Abständen zwischen dieser und den Enden der Pfeife (Fig. 7). Diese Löcher sind mit je einem dünnen Gummihäutchen abgeschlossen und außen von je einer flachen Metallklappe ebenfalls luftdicht abgedeckt. In diese so gebildeten flachen Hohlräume wird durch ein gemeinsames Rohr Leuchtgas geleitet, das aus je einem engen in der Mitte der Kappen angebrachten Röhrchen aus-



Fig. 6.
(Nach Tyndall.)

[1]) Tyndall, Der Schall, S. 219.
[2]) Daselbst, S. 220.

strömt und hier angezündet wird. Diese drei Flämmchen werden beim Anblasen der Pfeife bewegt, und zwar während des Grundtones zunächst die mittlere Flamme am meisten. Wird der Gasdruck jedoch auf einen gewissen Grad herabgesetzt, so löscht beim

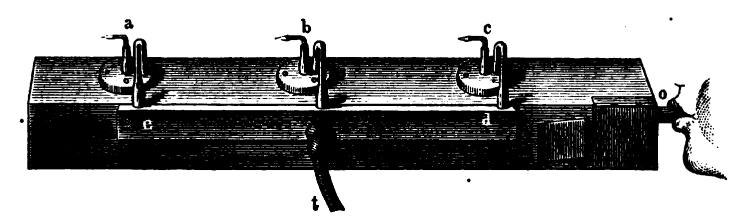


Fig. 7. (Nach Tyndall.)

Tönen der Pfeife die mittlere Flamme aus. Dieses Verlöschen kommt dadurch zustande, daß auf diese Stelle — die Knotenfläche *K* von beiden Seiten der Längsrichtung gleichzeitig dieselben Kräfte einwirken, die in abwechselnder Verdichtung und Verdünnung der Luftteilchen bestehen (Fig. 8a). Während der Verdichtung entsteht ein erhöhter Seitendruck, welcher die dünne Membran nach außen treibt und damit bei schwachem Gasdruck die flache Gaskapsel ventilartig schließt. Die beiden anderen Flämmchen an den Enden der Pfeife bleiben inzwischen unverändert brennen, weil hier die nur in der Längsrichtung schwingenden Luftteilchen sich an der Gummi-Membran vorbei und ohne Druck frei hin und her bewegen können. Wird derselbe Versuch bei verstärktem Anblasen wiederholt, so gibt die Pfeife die Oktave des Grundtones, also ihren ersten Oberton. Hierbei verlöschen die beiden seitlichen Flammen, während die mittlere allein weiterbrennt. Dies ist ein Beweis dafür, daß bei der Oktave, wie in Fig. 8b gezeigt wird, zwei Knotenflächen entstanden sind. An den Enden der Pfeife befindet sich dabei immer die freieste und größte Be-

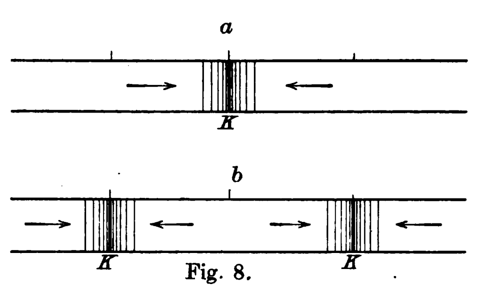


Fig. 8.

wegung der Luftteilchen, weil ihnen kein Druckhindernis wie im Innern der Röhre entgegenstellt ist.

Die größte „Schwingungsbreite“ entspricht, wie wir bei der von der Stimmgabel gezeichneten Sthwingungskurve gesehen haben, immer der Mitte eines Schwingungsbauches, wo ja die Ordinate, welche die Amplitude mißt, immer am größten ist (Fig. 9 A: b c, c′ b′). Demnach enthält die Röhre oder Flötenpfeife beim Grundton zwei halbe Schwingungsbäuche, und zwar die zwei mittleren Viertel c K c′ der ganzen Schwingung a K d, während die beiden äußeren

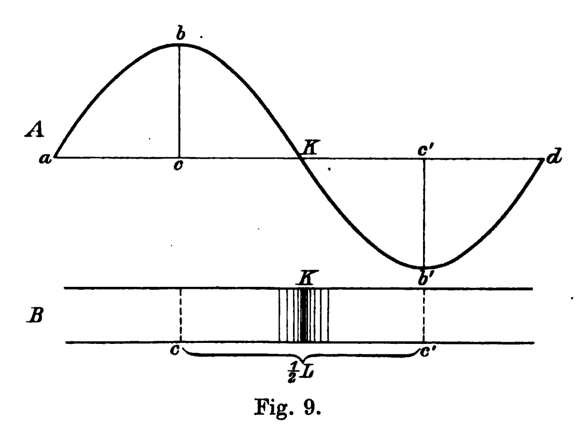


Fig. 9.

fehlenden halben Schwingungsbäuche a b und b′ d sich außerhalb der Röhre befinden (Fig. 9 B). Daraus ergibt sich, daß die Länge der Flötenpfeife in einem bestimmten Verhältnis zur Schwingungszahl, d. h. der Höhe ihres Grundtones steht. Das räumliche Maß für eine Schwingung ist die Strecke, in welcher sich eine Hin- und Herschwingung der Luftteilchen, eine Schallwelle, abspielt. Wenn nun der Weg, den der Schall in einer Sekunde zurücklegt, d. h. die Schallgeschwindigkeit, rund 340 Meter — bei 16° C — beträgt, so ist die Wellenlänge eines Tones von z. B. 258,7 Schwingungen in 1 Sekunde (= c′) begreiflicherweise = 340 : 258,7 = 1,3 Meter. Da jede Schwingung oder Schallwelle aus zwei ganzen Schwingungsbäuchen — Fig. 9 A: a b K + K b′ d — besteht, in der Röhre aber nur 2 halbe Schwingungsbäuche, also die Hälfte, enthalten sind, so muß eine Röhre, die c′ geben soll, $= \frac{1,3}{2} = 0,65$ m lang sein. Demnach gleicht die Länge einer

offenen Röhre oder Flötenpfeife der halben Wellenlänge (L) ihres Grundtones.

Wird der Anblasestrom bei der offenen Röhre oder der offenen Flötenpfeife verstärkt, so kommen nacheinander die harmonischen Obertöne zum Vorschein, deren Schwingungszahlen, wie bereits erwähnt, das 2-, 3-, 4- usw. -fache der Schwingungszahl des Grundtones betragen, also zu diesem in dem Ver-

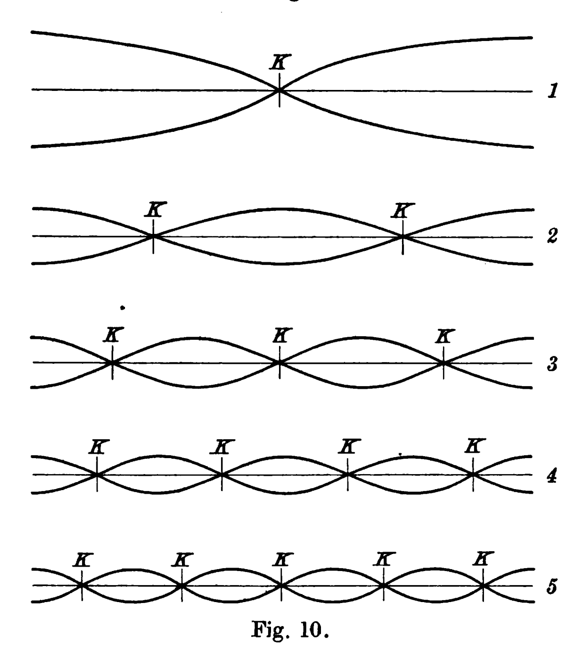


Fig. 10.

hältnis 1 : 2 : 3 : 4 usw. stehen. Da die Wellenlängen, wie aus der obigen Berechnung hervorgeht, mit zunehmender Höhe des Tones kürzer werden, also im umgekehrten Verhältnis zur Tonhöhe stehen, so sind die Wellenlängen der Obertöne = $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ usw. der Wellenlänge ihres Grundtones. Mit dieser Verkürzung der Wellenlängen muß in derselben Röhre oder Pfeife eine entsprechende Vermehrung der Knotenpunkte stattfinden (Fig. 10). Die Pfeife enthält beim

Grundton	$^1/_2$	Wellenlänge	mit	1 Knotenpunkt
Oktave	$^2/_2$	„	„	2 Knotenpunkten

Quinte	$^3/_2$	Wellenlänge	mit 3	Knotenpunkten
2. Oktave	$^4/_2$	,,	,, 4	,,
Terz usw.	$^5/_2$	,,	,, 5	,,

Dabei befindet sich wie beim Grundton an den freien Enden immer die Mitte eines Schwingungsbauches, so daß also der nächste Knotenpunkt vom Röhrenende stets $1/4$ Wellenlänge = $1/2$ Schwingungsbauch entfernt bleibt.

Denken wir uns die offene Röhre in der Mitte, also in der Knotenfläche, quer durchgeschnitten und an der Trennungsstelle K (Fig. 11 A) die Enden der beiden neu entstandenen Röhren geschlossen, so lehren uns diese letzteren das Prinzip der an einem Ende geschlossenen Röhren bzw. der gedeckten Flötenpfeifen (Fig. 11 B). Die Knotenfläche K bleibt an derselben Stelle, also an dem geschlossenen Ende der Pfeife, bestehen. Von dieser Tatsache kann man sich leicht durch das Gehör überzeugen, indem man das Innere des Rohres während der Resonanz mit Hilfe eines Hörrohres oder -schlauches abhört. König[1]) hat zu diesem Zweck einen besonderen, aber komplizierten Apparat konstruiert. Ich führe zu demselben Zweck eine mit einem Hörschlauch verbundene gerade Röhre allmählich in die Tiefe des gedeckten Rohres ein, während das letztere durch den gleichmäßigen Ton einer modifizierten Seebeckschen Sirene (s. 3. Kapit.) in Resonanz erhalten wird. Dabei nimmt man deutlich wahr, wie der Resonanzton immer lauter wird, je tiefer das Hörrohr eindringt, und am Boden die größte für das Ohr unangenehme Stärke erreicht, als Zeichen dafür, daß hier an dem geschlossenen Ende der größte Wechsel von Verdichtung und Verdünnung stattfindet. — Diese Tatsache, daß auch nach der Halbierung der offenen Röhre die Knotenfläche an derselben Stelle verblieben ist, bringt es mit sich, daß der Grundton der gedeckten Röhre gleich ist dem der doppelt so langen offenen Röhre. Da die Länge der letzteren der $1/2$ Wellenlänge ihres Grundtones entspricht, so gleicht demnach die halb

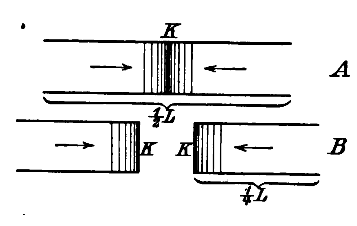


Fig. 11.

[1]) Auerbach, Akustik, S. 429.

so lange „gedeckte" Röhre der $\frac{1}{4}$ Wellenlänge desselben Grundtones. Weiterhin folgt daraus, daß eine „gedeckte" Pfeife die tiefere Oktave einer gleichlangen offenen Röhre gibt. — Durch verstärktes Anblasen lassen sich auch bei der „gedeckten" Pfeife die Obertöne zur Wahrnehmung bringen, und zwar leichter und deutlicher, als bei den offenen Röhren, weil die letzteren schwer ansprechen. Dabei stellt sich aber heraus, daß nur die Obertöne vorhanden sind, deren Schwingungszahl 3- 5- 7- usw. mal so groß ist als die des Grundtones. Dies ist eine im Wesen der einseitig geschlossenen Röhren begründete Notwendigkeit, die durch eine kurze Überlegung erklärlich wird. Der von dem offenen Ende in das Innere der Röhre sich fortpflanzende Schallimpuls stößt an dem gedeckten Ende auf einen unüberwindlichen Widerstand und erfährt hier eine Verdichtung, welche zur Bildung der Knotenfläche führen muß, während am offenen Ende selbst sich, wie bei den beiderseits offenen Röhren, die Mitte eines Schwingungsbauches befindet. Es werden demnach alle Obertöne zur Wahrnehmung kommen, welche diese beiden Bedingungen erfüllen, d. h. deren Wellenlängen so bemessen sind, daß am offenen Ende der Röhre die Mitte eines Schwingungsbauches, an der dem geschlossenen Ende entsprechenden Stelle eine Knotenfläche vorhanden ist. Aus der Fig. 10 entnehmen wir, daß dies außer 1, dem Grundton, nur bei den ungeraden Zahlen 3 und 5 der Fall ist. Dasselbe würden auch die nicht dargestellten Teiltöne 7 und 9 zeigen.

Diese Gesetze gelten für die Vorgänge in den „offenen" und „gedeckten" Flötenpfeifen unter der Voraussetzung, daß auch das Verhältnis der Röhrenweite zur Länge, welches die „Mensur" genannt wird, sich in mittleren Grenzen hält, d. h. etwa $^1/_{13}$ bis $^1/_{14}$ beträgt. Größere Weite vertieft den Ton und erfordert eine Verkürzung, engere Mensur erhöht den Ton und erheischt eine Verlängerung des Pfeifenkörpers. Außerdem muß die theoretische Länge der Pfeife von vornherein etwas verkürzt werden, weil die Flötenpfeifen an ihrem Fußende nicht ganz offen sind, sondern durch den hier angebrachten Mechanismus eine Deckung bis zu etwa $\frac{3}{4}$ des Querschnittes erfahren. Jede auch geringe Ab-Deckung eines Röhrenendes bewirkt aber eine Vertiefung des Eigentones und erfordert eine entsprechende Verkürzung der Pfeifenlänge. Dabei ist bemerkenswert, daß trotz dieser korri-

gierenden Verkürzung die Knotenfläche an derselben Stelle wie vorher verbleibt. Nahezu dieselben Verhältnisse der Pfeifenlänge zur Tonhöhe zeigen auch die konischen Röhren und Flötenpfeifen, sofern die Neigung der Seiten sich in gewissen Grenzen bewegt. Es tritt aber eine Verschiebung der Knotenfläche nach dem engeren Ende ein, damit die beiden durch die Knotenfläche getrennten Teile wie in der prismatischen „parallelen" Pfeife in stehender Welle schwingen können[1]).

Das Anblasen der Resonanzröhren geschieht mit einem durch die Mundlippen regulierten Blasestrom oder mit Hilfe eines an seinem freien Ende flachgedrückten Röhrchens, so daß der Luftstrahl den gegenüberliegenden Rand des Rohrendes trifft. Ebenso wird auch bei der Querflöte an ihrer seitwärts gelegenen „Mundöffnung" der Ton erzeugt. Dabei hängt die Ansprache und die Reinheit des Tones von der Stärke des Blasestromes, ganz besonders aber von seiner Richtung zu der gegenüberliegenden Kante ab. Die Flöten haben zu diesem Zweck einen festen, für jede Pfeife ausprobierten Mechanismus. Derselbe besteht wesentlich aus dem zwischen dem Kern d und dem unteren Labium gelegenen Kernspalt c d, dem oberen Labium a b und dem von den beiden Labien begrenzten „Aufschnitt". Die durch Bälge bewegte Luft tritt durch den Pfeifenfuß in den Windkasten K, dann aus diesem durch den Kernspalt c d als ein der Weite der letzteren entsprechend flacher Luftstrom heraus und trifft das obere Labium a b (Fig. 5). An diesem findet nach der Erklärung Tyndalls[2]) eine Brandung des Blasestromes statt. Dadurch entsteht ein schwirrendes Geräusch, aus dem gewisse Impulse die Luftsäule des Pfeifenkörpers in Schwingungen versetzen. Diese Impulse sind wesentlich Reibungsstöße. Eine Reibung kommt ja dadurch zustande, daß ein bewegter Körper mit einem zweiten ruhenden oder in anderer Geschwindigkeit bewegten Körper in Berührung kommt. Dann tritt ein Wechsel von gegenseitigem Festhalten und Loslassen der sich berührenden Körper ein. Bleiben die Geschwindigkeiten der letzteren konstant, so muß der Wechsel von Festhalten und Loslassen in periodischen, d. h. in gleichen Zeitabschnitten sich wiederholenden Stößen zum Ausdruck kommen. In diesem

[1]) Lord Rayleigh, Theorie des Schalles.
[2]) a. a. O., S. 216.

Sinne kann jede Reibung „rhythmisch" werden, wie z. B. das Reiben des Randes eines Weinglases mit dem nassen Finger, die Reibung beim Ausströmen einer Flüssigkeit aus einer engen Öffnung oder des Leuchtgases bei der singenden Flamme[1]).

Anders wird die Entstehung des Tones in den Flötenpfeifen von Sonreck[2]) erklärt. Nach seiner Ansicht reißt der Anblasestrom aus dem unteren Teile der Pfeife ruhende Luftteile mit sich fort und bewirkt dadurch in der Pfeife Luftverdünnung. In dem Augenblick, wo die letztere einen so hohen Grad erreicht hat, daß der äußere Luftdruck den Anblasestrom nach einwärts zu drücken vermag, schneidet sich am Ober-Labium ein Luftblatt ab, dringt in die Pfeife und erzeugt hier eine momentane Luftverdichtung. Die letztere pflanzt sich in der Längsrichtung des Körpers fort und stößt in der Mitte desselben mit dem Druck zusammen, welchen die äußere Luft, gleichzeitig auch der obere Teil der Luftsäule in der Pfeife ausübt. Hierdurch bildet sich eine Verdichtung (Knotenpunkt) in der Mitte des Pfeifenkörpers, welche nach beiden Seiten wirkend die Entstehung der akustischen stehenden Welle zur Folge hat. — van Shaik[3]) brachte die aus der Kernspalte kommende Luftlamelle durch Tabakpulver, das er in die Luftkammer und auf den Kern gestreut hat, zur Anschauung und betrachtete sie stroboskopisch.

Diese Beobachtung van Shaiks halte ich für eine Illustration der Theorie von Sonreck. Doch ist dabei wohl zu erwägen, daß der Bewegung des Luftblattes nach innen und außen immer die Reibung desselben am Ober-Labium vorausgehen muß. Diese Reibung kann sofort, mit dem Augenblick ihres Beginnens, ihre tonerregende Wirkung auf die Luftsäule der Pfeife ausüben, während das Mitreißen der in der Pfeife ruhenden Luft durch den Blasestrom erst allmählich einen so hohen Grad von Verdünnung erzeugt, daß das unter dem äußeren Luftdruck stehende Luftblatt sich nach innen beugt. Es ist demnach anzunehmen, daß der von Sonreck angenommene und von van Shaik experimentell nachgewiesene Vorgang erst eintritt, nachdem die in dem Pfeifenkörper befindliche Luftsäule, den Reibungsimpulsen des Blase-

[1]) Tyndall, S. 277.

[2]) Sonreck, Poggendorffs Annalen 1876, und Auerbach, Akustik, S. 436.

[3]) Auerbach, a. a. O. S. 436.

stromes folgend, bereits zu schwingen begonnen hat. Dann muß der flache Blasestrom die Schwingungen der Luftsäule in gleicher Periode mitmachen. Es würden demnach die obigen Darstellungen der Entstehung des Pfeifentones nicht als verschieden aufzufassen sein, sondern als gegenseitige Ergänzungen. Die Tyndallsche Brandung oder Reibung darf man als Ursache für den Ton umso weniger ausschalten, als der Orgelbauer erfahrungsmäßig anstreben muß, daß der Blasestrom gegen die Kante der Oberlippe bläst. Sollte die Sonrecksche Theorie allein zu Recht bestehen, dann müßte es zur Tonerzeugung genügen, über die Mundöffnung der Pfeife — den Aufschnitt — hinwegzublasen. Jeder Flötenbläser weiß aber, daß auf diese Weise die Flöte nicht anspricht, sondern erst wenn der aus der engen Spalte zwischen den Mundlippen hervortretende Luftstrom auf die gegenüberliegende Kante des Mundloches der Querflöte gerichtet wird. Im allgemeinen sollen deshalb die beiden Labien der Flötenpfeifen in einer Ebene liegen, doch wird diese Stellung im Interesse der leichteren Ansprache variiert. Es ist begreiflich, daß ein Wechsel dieser Stellung wesentlichen Einfluß darauf hat, ob und wieviel von dem Blasestrom in das Innere der Pfeife gelangt. Liegt das obere Labium über der Ebene des unteren, dann wird der Blasestrom bei der Brandung mehr nach innen, liegt es unter derselben, nach außen abgelenkt (vgl. Fig. 5). Auch wenn die Labien in einer Ebene liegen, müßte man annehmen, daß der größte Teil des Blasestromes in das Pfeifeninnere gelangt, weil sich ja der Kernspalt unter dem Unter-Labium befindet. Gleichwohl scheint dies nicht der Fall zu sein. Ich habe eine solche Pfeife mit Zigarrenrauch angeblasen und dabei gefunden, daß der größte Teil des Rauches aus dem Kernspalt und dem Aufschnitt gleich nach außen entweicht, während nur eine kleine Menge in die Pfeife selbst hineingeht, um langsam aus dem offenen Ende hervorzukommen. Bei der gedeckten Pfeife zeigt sich zuerst auch der kräftige, aus dem Kernspalt nach außen wirbelnde Rauchstrahl, und wenn dann der Deckel der Pfeife entfernt wird, so tritt aus dem nunmehr offenen Ende kein Rauch hervor, ein Beweis, daß von dem Blasestrom nichts in den Pfeifenkörper gedrungen ist.

Während die Stellung der beiden Labien zu einander eine rein mechanische Bedeutung hat, ist dagegen ihre gegenseitige Entfernung von besonderer Wichtigkeit für die Klang-

farbe des Tones. Hohe Aufschnitte geben einen weichen, dunklen Ton, mit wenig Obertönen, niedrige einen weniger angenehmen schärferen Klang mit viel Obertönen, der bei enger Mensur sogar einen scharf schneidenden streichenden, den Streich-Instrumenten ähnlichen Charakter annimmt. Mit diesem Wechsel der Klangfarbe ändert sich auch etwas das Verhältnis zwischen Pfeifenlänge und Tonhöhe, weil durch die Verkleinerung des Aufschnittes zum Teil eine „Deckung“ der unteren Pfeifenöffnung und mit ihr eine Vertiefung des Tones bewirkt wird. Diese Tatsache ist aber nur eine Nebenwirkung der Änderung des Aufschnitts und hat auf das Grundgesetz der Flötenpfeifen, wonach die Höhe des Tones lediglich durch die Länge des Pfeifenkörpers gegeben ist, keinen Einfluß. Ebensowenig ist dieses Gesetz dadurch eingeschränkt, daß die Tonhöhe durch eine Änderung in der Stärke des Blasestromes, d. h. der „Windstärke“, verstimmt wird. Um die Tonhöhe gleich zu erhalten, ist für jede Pfeife ein Blasestrom von bestimmter gleichbleibender Stärke notwendig. Im allgemeinen ist der Luftverbrauch abhängig von dem Querschnitt und von der Länge der Flötenpfeifen. Wenn gleichlange, aber verschieden weite Pfeifen gleichlaut sein sollen, so verhalten sich die für sie nötigen Luftmengen wie die Flächen ihrer Querschnitte. Demnach verbrauchen Pfeifen von weiter Mensur mehr Luft als enge. Das ergibt sich aus dem Gesetz, daß die Breite des „Querschnitts“ einer Flötenpfeife = $\frac{1}{4}$ ihres Umfanges sein soll. Da dieses Maß der Ausdehnung des oberen Labiums entspricht und dieses eine gleiche Breite des Kernspaltes erfordert, so wird mit der Vergrößerung des Labiums bei wachsenden Querschnitt der Pfeife auch eine Verbreiterung des Kernspaltes und damit des Blasestromes einhergehen müssen, die einen größeren Luftverbrauch zur Folge hat. Bei verschieden langen, aber gleich breiten Flötenpfeifen verhalten sich die verbrauchten Luftmengen umgekehrt wie die Quadratwurzeln der Pfeifenlängen. Demnach verbraucht dieselbe Pfeife, wenn sie auf $\frac{1}{4}$ ihrer Länge verkürzt wird, doppelt so viel Luft als in ihrer ursprünglichen Länge. Da aber mit der Verkürzung der Flötenpfeife ihr Ton höher wird, so wächst also bei gleichen Querschnitten der Luftverbrauch mit der Höhe des Tones. Auch diese Tatsache ist erklärlich, und zwar am leichtesten mit Hilfe der Tyndallschen Theorie von der Erregung des Tones durch Reibung oder Brandung des Blasestromes

am oberen Labium. Zweifellos ist hier die größere Luftmenge bei den höheren Tönen dazu nötig, den Reibungsimpulsen am oberen Labium die höhere Frequenz zu erteilen, die der größeren Schwingungszahl der zum Ton zu erregenden kürzeren Luftsäulen entspricht. Es muß zu diesem Zweck der Blasestrom schneller, d. h. in der Zeiteinheit mit mehr Luft an dem oberen Labium streichen, ebenso wie man beim Reiben einer rauhen Fläche, z. B. einer Feile mit einem Nagel, nur durch schnelleres Reiben einen höheren Reibeton erzielen kann. Wird die für jede Flötenpfeife durch Ausprobieren festgestellte Luftmenge geändert, so tritt eine Verstimmung der Tonhöhe im obigen Sinne ein, d. h. die Abschwächung des Blasestromes hat eine Vertiefung, die Verstärkung desselben eine Erhöhung des Tones zur Folge. Aus diesem Grunde sind die Flötenpfeifen einer Variation im Ausdruck nicht fähig, es sei denn, daß eine Vorrichtung an ihnen angebracht wird, welche diese Änderung der Tonhöhe bei verschiedener Windstärke ausgleicht. In der Tat hat man dies durch eine mit der Zunahme des Blasestromes veränderliche Länge des Körpers sowie mit einer kompensierenden Deckung des offenen Endes oder des Aufschnittes zu erreichen gesucht. Aber der Erfolg entsprach nicht den Erwartungen. Deshalb müssen in der Orgel wie für jeden Ton und seine verschiedenen Klangfarben, so auch für die zum musikalischen Ausdruck notwendigen Schattierungen der Tonstärke besondere Pfeifen aufgestellt werden. Demgegenüber befindet sich jedoch der Bläser der Querflöte im Vorteil. Er kann dem erwünschten Ausdruck entsprechend die Tonstärke wenigstens in gewissen Grenzen willkürlich wechseln, weil er die hiermit verbundene Änderung der Tonhöhe durch entsprechende Deckung oder Öffnung des Mundloches der Flöte mit seiner Unterlippe ausgleichen kann.

Im allgemeinen stellen die Flötenpfeifen somit ein starres System dar, in welchem ein Strom bewegter Luft durch Reibung an einer festen abgeschrägten Kante eines Rohres die in dem letzteren befindliche Luftsäule in Resonanz versetzt, und zwar in einem Tone, dessen Höhe nur durch den Eigenton des Resonanzraumes bzw. der in diesem enthaltenen Luft bestimmt ist. Es ist also hier der Blasestrom nur das Mittel, die bewegende Kraft zur Tonerzeugung; bei der Tongebung an sich ist er nicht beteiligt.

Drittes Kapitel.

Die Sirene von Seebeck, Cagnard de la Tour, Dove und Helmholtz — Die Zungenpfeifen der Orgel — „Aufschlagende“ und „durchschlagende“ Metallzungen — Ihre Schwingungszahl und Schwingungsart — Einfluß der letzteren auf die Klangfarbe — Das Ansatzrohr, dessen Zweck, Dimensionen, Verhältnis zur Tonhöhe und Klangfarbe — Der „Stiefel“ der Orgelpfeifen — Einfluß der Windstärke auf die Tonhöhe bei den Metallzungen und den sogenannten weichen Zungen — Klarinette, Oboe, Fagott, Trompete — Harmonium — „Vox humana“.

Ein Windstrom kann aber selbst in tönende Schwingungen versetzt werden, sobald ihm eine Vorrichtung in den Weg gestellt ist, welche seine Bewegung in gleichmäßigen Zwischenräumen unterbricht. Dies geschieht z. B. durch die Sirene von Seebeck. Dieselbe besteht aus einer um ihre Achse drehbaren Scheibe, welche parallel der Peripherie in gleichen Abständen angebrachte Löcher hat. Wenn man diese Scheibe durch einen geeigneten Mechanismus, z. B. durch einen Elektromotor oder durch ein Uhrwerk, in gleichmäßige Rotation versetzt und dann eine Lochreihe anbläst, so wird ein musikalischer Ton vernehmbar, dessen Schwingungszahl gleich ist der Zahl der Unterbrechungen des Blasestromes

Fig. 12.

in 1 Sekunde, oder mit anderen Worten: gleich dem Produkt der Umdrehungen der Scheibe in 1 Sekunde und der Zahl der Scheibenlöcher. Wenn z. B. die Scheibe 10 Löcher hat und in der Sekunde 29 Umdrehungen macht, so wird der Blasestrom $10 \times 29 = 290$-mal unterbrochen und gibt somit den Ton d', dessen Schwingungszahl nach internationaler Stimmung 290 beträgt. Während der Blasestrom bei der Rotation der Scheibe durch jedes Scheibenloch freien Weg hat, wird ihm der letztere durch die Zwischenräume (Fig. 12 z) der Löcher (L) versperrt. Die Folge davon ist, daß auf der Windseite der Scheibe vor jedem Zwischenraum eine Luftverdichtung (Fig. 12 +) entsteht, die sich bei dem nächsten Scheibenloch, durch welches die Blaseluft wieder frei ausweichen kann,

in Luftverdünnung (Fig. 12 —) umsetzt. Auf der anderen, dem Blasestrom abgekehrten Seite herrscht der entgegengesetzte Zustand der Luft. Hier entsteht vor jedem Loch infolge des stoßartigen Durchströmens der verdichteten Luft Luftverdichtung (+). In dem Augenblick aber, wo an die Stelle des Loches der Zwischenraum rückt, fehlt der vorwärts bewegten Luft der Nachschub und damit muß dort jetzt Verdünnung (—) eintreten. Da dieser Wechsel des Luftzustandes einer „Schwingung" oder „Schallwelle" entspricht, so bestimmt die Zahl der Zwischenräume oder der Löcher, welche vor dem Luftstrom in 1 Sekunde vorübergehen, die Höhe des Tones. Diese bleibt auch bei Verstärkung des Blasestromes gleichmäßig, weil die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe durch einen eigenen Mechanismus: Elektromotor oder Uhrwerk, bestimmt und von der Windstärke unabhängig ist. Im Gegensatz hierzu wird bei der Sirene von Cagnard de la Tour[1]) (Fig. 13, schematisch), die später besonders von Dove und Helmholtz[2]) verbessert ist, der Blasestrom als Kraft für die Bewegung der Scheibe benutzt. Die Folge davon ist, daß mit der Verstärkung des Blasestromes die Zahl der Umdrehungen der Scheibe wächst und damit der Ton erhöht wird.

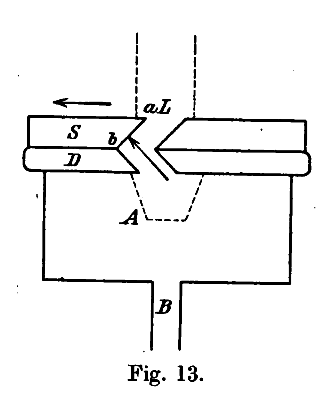


Fig. 13.

Die Scheibe dieser Sirene befindet sich über einem Windkasten A, der durch das Rohr B mit einem Blasebalg verbunden wird; der unmittelbar unter der verhältnismäßig dicken Scheibe S liegende Deckel D des Windkastens hat ebenso viele und an derselben Stelle liegende Löcher wie die Scheibe. Diese Löcher sind schräg gebohrt, und zwar im Deckel des Windkastens in der Richtung der Rotation der Scheibe, in der letzteren entgegengesetzt, so daß sie übereinanderstehend einen Winkel bilden, wie aus der schematischen Fig. 13 L ersichtlich ist. Wenn der Blasestrom die schräge Fläche a b der Scheibe S trifft, so muß

[1]) Auerbach, S. 182. — Tyndall, Schall, S. 75 ff.
[2]) Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, S. 270.

die Scheibe sich in dem Sinne des oberen Pfeiles fortbewegen. Diese Bewegung tritt umso leichter ein, als bei sämtlichen Scheibenlöchern dieselbe Angriffsfläche durch die im Windkasten vorhandene Luft zu gleicher Zeit angeblasen wird. Begreiflicherweise wird durch das Anblasen aller Löcher auch der Ton viel stärker als bei der Seebeckschen Sirene.

Wie bei der Sirene von Cagnard de la Tour der aus dem Windkasten entweichende Blasestrom dadurch, daß er die Scheibe S in Rotation versetzt, sich selbst unterbricht bzw. in einzelne periodische Stöße zerlegt, um seine Bewegung in einen Ton umzusetzen, ebenso tönt auch bei der Zungenpfeife der Blasestrom dadurch, daß er ein ihm in den Weg gestelltes elastisches Metallblättchen, die „Zunge", in Schwingungen versetzt, welche ihn selbst in periodische tongebende Stöße zerlegen.

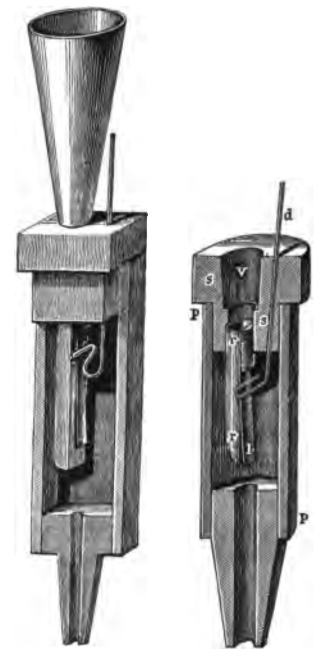


Fig. 14. (Nach Helmholtz.)

Betrachtet man die Zungenpfeife Fig. 14 im Vergleich mit der Flötenpfeife Fig. 5, so zeigt sich, daß der Windkasten K der Flötenpfeife bei der Zungenpfeife zu einem mehr oder weniger langen Windrohr, dem „Stiefel", verlängert ist. Am oberen Ende des Stiefels befindet sich die den Ton erzeugende Mechanik in dem Mundstück S, das den Stiefel dicht abschließt. Der „Kopf" dieses Mundstücks ist in der Längsrichtung der Pfeife durchbohrt. In dieser Bohrung sitzt oben der „Schallbecher", „Körper" oder „Aufsatz", während in ihrer unter dem Kopf gelegenen Öffnung der Zungen-Mechanismus r und l eingelassen ist.

Derselbe besteht aus dem „Schnabel" r, einem unten geschlossenen, in seiner Längsrichtung halbierten Rohr, in dessen offene, die Halbierungsseite, eine mit einem langen viereckigen Schlitz versehene Messingplatte: der Rahmen, eingelötet ist.

Auf diesem Rahmen liegt über dem Schlitz ein seiner Form entsprechendes, meist aus Messing bestehendes elastisches Metallblatt, die „Zunge" l. Dieselbe ist mit ihrem oberen Ende dicht unter den Kopf des Mundstückes auf dem Rahmen angelötet oder angeschraubt, so daß also ihr freies Ende in der senkrecht stehenden Pfeife nach unten in den Stiefel hinein gerichtet ist. Wenn die Zunge größer ist als der Rahmenschlitz, so daß sie seine Ränder bedeckt, so ist sie eine „aufschlagende", weil sie, durch Anblasen in Schwingungen versetzt, beim Rückschwingen auf den Rahmen aufschlagen muß. Gleicht dagegen die Größe der Zunge dem Rahmenausschnitt, so daß sie sich ohne Reibung in demselben frei bewegen kann, dann heißt sie „durchschlagend". Die „durchschlagenden" Zungen finden bei uns erst seit dem Ende des 18. Jahrhunderts Verwendung, wo sie Kratzenstein[1]) in Petersburg dem chinesischen Instrument Tscheng entnommen und für seine Sprechmaschine gebraucht hat. In der Orgel sind dieselben nur zum Teil vertreten, dagegen haben das Harmonium, die Zieh- und Mundharmonika nur durchschlagende Zungen. Der genannte Unterschied der Zungen bedingt auch eine verschiedene Art wie sie durch den Blasestrom in Schwingungen versetzt werden.

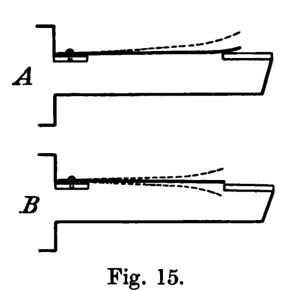


Fig. 15.

Die „aufschlagenden" Zungen sind zur Erleichterung ihrer Bewegung an ihrem freien Ende von ihrer Unterlage etwas abgebogen, so daß ein schmaler Spalt zwischen dem Rahmen und der Zunge freibleibt (Fig. 15 A). Durch diesen Spalt sucht der Blasestrom seinen Ausweg und hebt dabei die Zunge vom Rahmenausschnitt ab, wodurch der letztere geöffnet wird. Sobald die Zunge das Maximum ihrer Erhebung erreicht hat, schnellt sie vermöge ihrer Elastizität zurück und schlägt auf den Rahmen auf. Darauf wiederholt sich der Vorgang.

Die „durchschlagenden" Zungen (Fig. 15 B) haben, sofern sie ebenfalls am freien Ende abgebogen sind, dieselbe Bewegungsfolge. Doch liegen sie im allgemeinen kaum über dem Rahmenausschnitt, ja die größeren Zungen des Harmoniums sind sogar

[1]) W. Weber, Annal. d. Physik, 1828, Bd. 14.

in den Rahmenschlitz hineingebogen. Die Folge davon ist, daß in diesen Fällen die Zungen durch den Blasestrom zuerst in den Rahmen hineingedrückt werden, dann vermöge ihrer Elastizität dem Blasestrom entgegen emporschnellen, um sich hierbei über den Rahmen zu erheben und damit seinen Ausschnitt zu öffnen. Jetzt erst erhält der Windstrom seinen freien Durchgang und unterstützt die Zunge in ihrer Bewegung zur höchsten Erhebung über den Rahmen, bis ihre beanspruchte Elastizität ihr die Kraft gibt zum Rückschwung in ihre Ruhelage und darüber hinaus in den Rahmenausschnitt hinein.

Wird, wie eben erwähnt, der Rahmen dadurch geöffnet, daß sich die Zunge in den Stiefel bzw. den Windraum hinein dem Blasestrom entgegen bewegt, so nennt sie Helmholtz „einschlagend“ im Gegensatz zu den „ausschlagenden“ Zungen, welche sich beim Öffnen des Rahmenschlitzes im Sinne der Windrichtung bewegen. Die Zungen der gebräuchlichen Blase-Instrumente: der Orgelpfeifen, Klarinette, Oboe, des Fagotts bewegen sich „einschlagend“. „Ausschlagend“ dagegen öffnen die Zungen den Rahmenspalt bei der Zieh- und Mundharmonika.

Diese mit Hilfe des Blasestromes von der Zunge ausgeführte Öffnung und Schließung des Rahmenausschnittes teilt den Blasestrom in mehr oder weniger plötzlich aber regelmäßig unterbrochene Luftstöße, welche allein den hörbaren Klang geben. Die Höhe dieses Klanges wird durch die Schwingungszahl der Zunge in der Sekunde bedingt. Seine Klangfarbe hängt davon ab, ob die Unterbrechungen des Luftstromes total und plötzlich oder nur teilweise und allmählich bewirkt werden. Im ersten Falle hat der Klang viel, im zweiten weniger Obertöne.

Die Schwingungen der Zungen sind transversal und finden nach den Gesetzen eines an einem Ende eingeklemmten transversal schwingenden Metallstabes statt. Demnach ist ihre Schwingungszahl umso größer, je kürzer oder dicker die Zunge und je elastischer ihre Substanz ist. Bei gleichbleibender Länge nehmen die Schwingungszahlen im geraden Verhältnis mit der Dicke zu und ab. Bei gleicher Dicke ist die Zahl der Schwingungen in 1 Sekunde dem Quadrat der Länge der Zunge umgekehrt proportional: oder mit anderen Worten: die Längen L gleichdicker Zungen verhalten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln ihrer Schwingungszahlen S.

$$S : S_1 = L_1^2 : L^2$$
$$\sqrt{S} : \sqrt{S_1} = L_1 : L$$

Die Form der Schwingungen ist bei den „aufschlagenden', Zungen eine zusammengesetzte, weil die Bewegung dieser Zungen gegen den Rahmen eine beschleunigte, nach dem Aufschlagen auf den letzteren eine langsamere ist. „Durchschlagende" Zungen zeigen nach Grützner[1]) nur dann einfache, also pendelartige Schwingungen, wenn sie in ihrer ganzen Länge gleichmäßig dick sind. Die an dem freien Ende dünneren Zungen führen dagegen ebenfalls zusammengesetzte Schwingungen aus. Helmholtz (a. a. O. S. 166) hat eine durchschlagende Zunge, deren Eigenschaften er nicht näher angibt, mit dem Lissajonschen Vibrations-Mikroskop untersucht und dabei einfache pendelartige Schwingungen festgestellt. Aus dieser Tatsache schließt er gleichzeitig, daß nicht die Zunge selbst der tönende Teil ist, sondern die von den Zungenschwingungen abgeteilten periodischen Luftstöße. Die Zunge selbst müßte mit den beobachteten einfachen pendelartigen Schwingungen auch einen einfachen von Obertönen freien Ton geben. Da es aber erwiesen ist, daß die von den Zungen erzeugten Klänge reich an Obertönen sind, so können sie nur der Ausdruck der Schwingungen des Blasestromes sein. Helmholtz (a. a. O., S. 165) schreibt darüber: „Eine freischwingende Zunge hat eine viel zu kleine Oberfläche, als daß sie eine irgendwie in Betracht kommende Qualität von Schallbewegung an die Luft abgeben könnte; ebensowenig geschieht dies in den Pfeifen. Der Schall entsteht vielmehr ganz so wie in der Sirene, deren Metallscheibe gar keine Schwingungen ausführt, nur durch Luftstöße. Durch die wechselnde Öffnung und Verschließung des Kanals wird der kontinuierliche Fluß des Luftstroms in eine periodisch wiederkehrende Bewegung verwandelt, welche das Ohr zu affizieren vermag. Wie jede periodische Bewegung der Luft kann auch diese in eine Reihe von einfachen Schwingungen zerlegt werden .... Die Zahl der Glieder einer solchen Reihe ist desto größer, je diskontinuierlicher die zu zerlegende Bewegung ist. Das ist nun die Bewegung der durch eine Sirene oder an einer Zunge vorbeiströmenden Luft in hohem Grade, da die einzelnen Luftstöße während der Zeiträume, wo die Öffnung geschlossen ist, meist

[1]) P. Grützner, Physiol. d. Stimme u. Sprache, S. 15.

durch vollständige Pausen voneinander getrennt sein müssen. Freie Zungen ohne Ansatzrohr, bei denen alle die einzelnen einfachen Töne der von ihnen erregten Luftbewegung unmittelbar und frei an die umgebende Luftmasse übergehen, haben deshalb immer einen sehr scharfen, schneidenden oder schnarrenden Klang, und man hört in der Tat mit bewaffnetem (Resonator) oder unbewaffnetem Ohr eine Reihe von Obertönen bis zum sechszehnten oder zwanzigsten stark und deutlich, und noch höhere Obertöne sind offenbar vorhanden, wenn auch schwer oder gar nicht voneinander zu unterscheiden, da sie einander näher liegen als halbe Tonstufen. Dieses Geschwirr dissonierender Töne macht die Klänge freier Zungen sehr unangenehm.“ — Das letztere trifft in erhöhtem Maße bei den „aufschlagenden“ Zungen zu, welche gerade im Zustande ihrer größten Bewegung behindert werden, über ihre Ruhelage hinauszuschwingen und in ihrer schnellsten Bewegung heftig auf den Rahmen aufschlagen müssen. Schon dieses Aufschlagen bedingt verschiedene Vibrationen, ein Schnarren der Zunge, welches den Zungenpfeifen der Orgel auch den Namen „Schnarrwerk“ eingetragen hat. Der Orgelbauer hat jedoch auf dem Wege der Erfahrung gelernt, die störenden Geräusche und Obertöne wesentlich zu vermindern und zwar zunächst dadurch, daß er den Aufschlag der Zunge weicher und allmählich stattfinden ließ. Zu diesem Zweck wurde bei den aufschlagenden Zungen die Oberfläche des Rahmens mit Leder belegt. Außerdem erhielten die Zungen eine von dem Rahmen abgewandte flache Biegung, welche mitunter so weit ist, daß das freie Ende um die Schwingungsweite vom Rahmen absteht (Toepfer, S. 293). Diese Biegung bewirkt, daß der Rahmenausschnitt vom Befestigungspunkte der Zunge aus bis zu ihrem freien Ende nicht plötzlich, sondern allmälich geschlossen wird. Außerdem aber hat auch die Form und die Stellung der Zunge zur Richtung des Blasestroms einen wesentlichen Einfluß auf die Klangfarbe. Breite Zungen geben einen milden, runden, vollen, schmale einen scharfen, spitzen Ton. Die letzteren sind leichter beweglich und erzeugen damit schnell und plötzlich unterbrochene „diskontinuierliche“ Luftstöße. Breite Zungen öffnen den Rahmenschlitz langsamer und gestatten dem Luftstrom in nur allmählich zunehmender Menge durch die Öffnung zu streichen. Dementsprechend entstehen durch die schmalen Zungen viel, durch die breiten weniger Obertöne. Ferner bewirken

die senkrecht gestellten Zungen der Orgelpfeifen einen mehr streichenden Ton als die horizontalen des Harmoniums[1]).

Die größte Bedeutung für die Klangfarbe der durch die Zungen erzeugten Klänge hat das Ansatzrohr: der „Aufsatz" „Körper" oder „Schallbecher". Über den Zweck des Ansatzrohres sagt der erfahrene Organist J. G. Toepfer[2]) (geb. 1791), der seiner Arbeit über die Orgelbaukunst eingehende eigene Studien zugrunde gelegt hat, Folgendes: „Die Erfahrung hat längst gefunden, daß der schwingenden Zunge ein Resonanzkörper gegeben werden muß. Dies geschieht erstens, um der Zunge eine sichere Ansprache zu geben, zweitens um den Ton zu veredeln und musikalisch brauchbar zu machen ... Beobachtet man eine ohne Aufsatz schwingende „durchschlagende" Zunge, so kann man sehen, wie diese in eine schiefe Stellung kommt, und zwar umso leichter, wenn die Zunge dünn und der Windgrad hoch ist. Sie wird von dem Luftdruck in den Rahmen hineingedrängt, sobald ihre eigene Federkraft die auf ihr ruhende Last des Windes nicht überwinden kann, sie hört auf, Luft in das Mundstück einzulassen, und verstummt. — Etwas ähnliches findet auch bei den „aufschlagenden" Zungen statt, welche aufhören zu schwingen, wenn die eigene Federkraft nicht ausreicht, um den Rückgang der Zunge gegen die Kraft des Luftdrucks durchzusetzen. Beide Zungen bedürfen einer Hilfe, eines Gegenstoßes, welcher aus dem Inneren des Mundstückes heraus erfolgt und im geeigneten Momente die Rückschwingung unterstützt. Die Erfahrung hat darauf geführt, eine Röhre ausprobierter Länge aufzusetzen; wir können aber nur von vornherein annehmen, daß es die in dieser Röhre auf- und ablaufende Tonwelle ist, welche Hilfe bringt. Sobald der „Schallkörper" der Zunge zugefügt wird, verändert sich der Ton. Er wird runder, voller, die Schärfe, das Schnarren, der schrille Nebenton verschwindet und es entsteht ein Klang von musikalischem Werte."

Das Ansatzrohr hat also zwei Aufgaben, eine mechanische und eine musikalische. Die erstere besteht darin, daß die Schwingungen der im Ansatzrohr befindlichen Luftsäule die Beweglichkeit der Zunge unterstützen. Wir werden auf sie späterhin noch einmal zurückkommen. Die zweite, hier zunächst zu erörternde musikalische

---

[1]) W. Riehm, Harmonium, Stuttgart 1897.

[2]) Toepfer, a. a. O. S. 296.

Aufgabe bezieht sich nur auf die Verbesserung der Klangfarbe des von der Zunge bewirkten Klanges der schwingenden Blaseluft. Dieser Einfluß auf die Klangfarbe kommt dadurch zum Ausdruck, daß durch den „Schallkörper“ als Resonanzrohr entweder der Grundton des Klanges oder nach Ermessen bestimmte Obertöne des letzteren besonders deutlich hervortreten und andere lästige ausgelöscht werden. Helmholtz[1]) setzte über eine Messingzunge einen seiner kugelförmigen Resonatoren, welcher auf den Ton der Zunge abgestimmt war, und erzielte damit einen vollen, schönen, weichen Klang im Grundton des von der freien Zunge bewirkten Klanges, dem fast alle Obertöne fehlten. Gleichzeitig aber stellte sich auch eine geringe Vertiefung des Tones ein, welche wohl dadurch zu erklären ist, daß der von der Zunge in Schwingungen versetzte Blasestrom nunmehr in einen begrenzten Raum hineinschwingt, wo die von der Zunge erzeugte Bewegung durch den Widerstand an den Wänden des Resonators eine Verzögerung erleidet. Durch weitere Versuche stellte Helmholtz fest, daß zylindrische Schallkörper nur die ungeradzahligen, kegelförmige aber alle harmonischen Obertöne bis zu einer gewissen Höhe verstärkten. Der Orgelbauer wählt diese Formen nach Bedarf und Erfahrung. Für Stimmen, die einen schwachen zarten Klang haben sollen, wählt er die zylindrische Form oder zwei mit ihrer Basis zusammengelötete Kegel. Die gebräuchlichsten „Aufsätze“ sind aber die kegel- oder trichterförmigen, weil sie den vollsten und stärksten Klang geben.

Die Dimensionen der Aufsatzröhren müssen dem Begriff der Resonanz entsprechend so gewählt sein, daß ihre Luftsäule auf die von der Zunge ausgehenden Impulse reagieren, d. h. mittönen kann. Dafür ist aber, wie bei den Flötenpfeifen, auch hier im allgemeinen die Länge des Schallkörpers maßgebend. Wir wissen, daß die Länge einer offenen Flötenpfeife der $1/2$ Wellenlänge ihres Tones gleicht, daß dagegen eine denselben Ton gebende gedeckte Pfeife nur halb so lang ist, also der $1/4$ Wellenlänge desselben Tones entspricht. W. Weber[2]) hat in seinen Versuchen über die Beziehungen zwischen Zunge und Ansatzrohr gefunden, daß mit einem „Aufsatz“, dessen Eigenton mit dem von der

[1]) a. a. O. S. 167.
[2]) Poggendorffs Annal. 1829, XVI, S. 434.

Zunge bewirkten Ton übereinstimmte, dieser ursprüngliche Ton um eine Oktave vertieft wurde, d. h. das an beiden Seiten offene Ansatzrohr wirkt in Verbindung mit einer Zunge als gedeckte Pfeife, denn der Eigenton einer gedeckten Pfeife ist ja immer eine Oktave tiefer als der einer gleich langen offenen Resonanzröhre. Die Zungenpfeifen sind demnach sozusagen umgekehrte Gedecktpfeifen. Bei den gedeckten Flötenpfeifen befindet sich der tonerregende Mechanismus an dem offenen unteren Ende, während das obere geschlossen ist; in den Zungenpfeifen dagegen ist der Zungenmechanismus als in das geschlossene Ende eingelassen anzusehen, während das offene nach oben gerichtet ist. — Wie in der gedeckten Flötenpfeife die Knotenfläche mit dem größten Druckwechsel sich am geschlossenen Ende befindet, so liegt dieselbe dementsprechend auch hier dicht über und unter der Zunge. Das ergibt sich eigentlich schon aus dem Zweck der Mechanik; denn die Zunge wird ja, ähnlich wie die Scheibe der Sirene von Cagnard de la Tour, nur durch den unterhalb derselben vermehrten Luftdruck bewegt und in Schwingungen versetzt, um wechselnde Luftverdichtungen und -verdünnungen zu erzeugen. Gleichwohl kann man sich von der Tatsache mit Hilfe meiner oben erwähnten Auskultationsmethode überzeugen: der Ton wird umso lauter gehört, je tiefer der Hörschlauch in das Ansatzrohr hineingesenkt wird, und erreicht dicht über der Zunge die größte Stärke.

Wenn nun die Zungenpfeifen als gedeckte Pfeifen aufzufassen sind, so gelten für die Länge ihrer Ansatzröhren, soweit sie zylindrisch oder leicht konisch sind, auch die entsprechenden Gesetze, d. h. der von der Zunge bewirkte Klang findet die beste Resonanz seines Grundtones, wenn das Ansatzrohr der $\frac{1}{4}$ Wellenlänge des letzteren gleicht. Bei größerer Länge beginnt das Ansatzrohr seinen bereits erwähnten mechanischen Einfluß auf die Zungenschwingungen weiter zu entfalten, insofern als die Schwingungen seiner Luftsäule die Zunge zwingen, mit ihnen in gleicher Periode zu schwingen. Es stellt sich demnach mit der Verlängerung des Schallkörpers eine entsprechende Vertiefung des Tones ein, die jedoch nach jeder $\frac{1}{2}$ Wellenlänge des Rohres zur ursprünglichen Tonhöhe umspringt. Mit dieser künstlichen Vertiefung des Zungentones tritt nach Toepfers Versuchen eine Verschlechterung und Abschwächung des Tones — bis zum Verlöschen desselben ein.

Um die Gesetze dieser Tonvertiefung zu fixieren und möglichst auch eine Erklärung dafür zu finden, sind von W. Weber, Willis, Grützner, Toepfer eingehende Untersuchungen gemacht worden. Die Erörterung der Resultate derselben geht jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Es genügt vielmehr, mit Auerbach [1]) anzugeben, daß es sich bei diesen Erscheinungen um einen Kampf zwischen den Schwingungen der Zunge und dem Eigenton des Ansatzrohres handelt, in dem die Zunge immer wieder als Siegerin hervorgeht, sobald die Rohrlänge die $\frac{1}{2}$ Wellenlänge des ursprünglichen Tones oder ein Vielfaches derselben erreicht. Es ist dann nach W. Weber [2]) in der verlängerten Röhre die Zahl der schwingenden Abteilungen vermehrt, insofern mit jeder $\frac{1}{2}$ Wellenlänge eine neue Knotenfläche hinzukommt — denn jede $\frac{1}{2}$ Welle wird ja von 2 Knotenflächen begrenzt —, während die Entfernung zwischen den Knotenflächen gleich und damit die ursprüngliche Tonhöhe erhalten bleibt.

Gegen diese mechanische Wirkung der Schwingungen im Ansatzrohr verhalten sich die beiden Zungenarten verschieden. Die „aufschlagenden" Zungen sind ihr mehr unterworfen, als die „durchschlagenden". Der Grund davon liegt in dem Umstande, daß die „aufschlagende" Zunge eine viel geringere Kraft und kein Beharrungsvermögen hat, weil sie im Augenblick ihrer größten Geschwindigkeit im Rückschwung auf den Rahmen aufschlagen muß und sich dadurch „totschlägt". Nach ihrem Aufschlagen auf den Rahmen bedarf sie aus der dem Windstrom entgegengesetzten Richtung — von außen her — unterstützender Bewegungsimpulse, welche ihr helfen, sich wieder vom Rahmen ab- und dem Windstrom entgegen zu bewegen, um den Rahmen zu öffnen. Diesen erneuten Anstoß erhält sie durch die Schwingungen der im Ansatzrohr befindlichen Luftsäule. Die „aufschlagende" Zunge ist deshalb auf die Beeinflussung durch das Ansatzrohr angewiesen und ohne dasselbe unbrauchbar [3]). — Die „durchschlagenden" Zungen haben dagegen im allgemeinen die doppelte bis dreifache Masse der „aufschlagenden", sie sind länger und breiter. Da sie zudem unbehindert durch den Rahmen frei hin,

---

[1]) a. a. O. S. 466.

[2]) W. Weber, Versuche mit Zungenpfeifen. Poggendorffs Annalen 1829, XVI, S. 434.

[3]) a. a. C. Toepfer, S. 294.

und herschwingen können, so besitzen sie ein größeres Beharrungsvermögen, welches dem Einfluß veränderter Impulse wenig oder gar nicht zugänglich ist. Dieses große Beharrungsvermögen aber bringt andererseits den Nachteil mit sich, daß die „durchschlagenden“ Zungen schwer ansprechen. Namentlich die größere Breite dieser Zungen bedingt ein Mißverhältnis zwischen dem Anblasestrom und ihrer Elastizität, welches darin besteht, daß die Federkraft der Zunge nicht ausreicht, den auf ihr lastenden Druck des Windstromes zu überwinden und in diesen letzteren hineinzuschwingen. Diese Schwierigkeit wird erfahrungsmäßig dadurch beseitigt, daß die Zungenpfeifen mit „durchschlagenden“ Zungen einen längeren Stiefel (= Windkasten) erhalten, damit die in diesem befindliche Luftsäule die Zungenschwingungen unterstützen kann. Auch in dem Stiefel entstehen nämlich bei genügender Länge desselben Schwingungen in stehender Welle, die sich während des Tönens der Pfeife durch kräftige, mit der Hand leicht fühlbare Erschütterungen der Stiefelwandungen bemerkbar machen. Übrigens konnte ich mich davon, daß auch in dem unter der Zunge befindlichen Raume Schwingungen stattfinden, dadurch leicht überzeugen, daß ich das Mundstück einer „durchschlagenden“ Zungenpfeife (von humana a) in den Mund nahm und anblies: dabei merkte ich deutliche Vibrationen im Halse bis tief in die Brust hinein, die auch äußerlich auf der Brust mit der Hand fühlbar waren. Diese letztere Erscheinung zeigt sich ja bekanntlich auch beim Singen von Brusttönen. — Damit nun die in dem Stiefel entstehenden Erschütterungen die Zungenschwingungen unterstützen können, müssen sie mit den letzteren gleichzeitig sein. Dies trifft also theoretisch am besten zu, wenn die Länge des Stiefels der ¼ Wellenlänge des Pfeifentones entspricht. Da aber bei der Bestimmung dieser Stiefellänge auch die Schwingungen der schwer zu berechnenden Räume unterhalb des Stiefels in Betracht gezogen werden müssen, so wird die erforderliche Länge des Stiefels praktisch ausprobiert. Im allgemeinen aber haben die durchschlagenden Zungen zur Unterstützung ihrer Schwingungen lange Stiefel, während das Ansatzrohr, welches hier wesentlich zur Erzeugung einer bestimmten Klangfarbe dienen und keinen Einfluß auf die Schwingungszahl der Zunge haben soll, möglichst kurz bemessen ist.

Die „aufschlagenden“ Zungen dagegen bedürfen der Nach-

hilfe durch die Schwingungen im Stiefel nicht und sind demgemäß mit nur kurzen Stiefeln versehen, weil ihre Schwingungen bereits unter dem Einfluß eines langen Ansatzrohres stehen. Diese letztere Tatsache bedingt aber noch die weitere bemerkenswerte Eigentümlichkeit der aufschlagenden Zungenpfeifen, daß sie bei verstärktem Anblasen ihren Ton erhöhen. Im allgemeinen bringt nach den Untersuchungen von W. Weber Verstärkung des Blasestroms bei den leicht beweglichen transversal schwingenden Zungen eine Vertiefung ihres Tones mit sich, weil die nun vergrößerte Schwingungsbreite wie bei einem weiter ausschlaggebenden Pendel die Schwingungszahl verringert. Bei Verringerung der Windstärke tritt dementsprechend eine Erhöhung des Tones ein. In der Kombination der Zunge mit einer longitudinal schwingenden Luftsäule aber hängt die Veränderung der Tonhöhe durch den Blasestrom von der Übermacht der Luftsäule oder der Zunge ab. Da die aufschlagenden Zungen dem Einfluß und der Übermacht des Ansatzrohres unterworfen sind, so tritt die Tonveränderung hier nach dem für die longitudinal schwingenden Luftsäulen geltenden Gesetz ein, d. h. ihr Ton wird wie bei den Flötenpfeifen durch stärkeres Anblasen höher.

Diese letztere Eigenschaft haben die aufschlagenden Zungenpfeifen mit den Blaseinstrumenten gemein, welche mit sogenannten weichen Zungen versehen sind. Dazu gehört die Klarinette mit zylindrisch geformtem Ansatzrohr und die Oboe, das Fagott, die Trompete, deren Ansatzrohr eine kegelförmige Gestalt hat — also am freien Ende erweitert ist. Die drei ersteren Instrumente haben Zungen aus dünnen Holzplättchen, welche sich einschlagend öffnen. Das Mundstück der Klarinette hat nur eine und zwar breite Zunge z, welche „aufschlagend“ montiert, aber so gestellt ist, daß sie mit ihren infolge ihrer Masse nur kleinen Exkursionen nicht aufschlägt (Fig. 16 A). Die Öffnung im Schnabel wird demnach während der Zungenschwingungen abwechselnd „erweitert“ und „verengert“ und nicht wie bei den aufschlagenden Metallzungen „geöffnet“

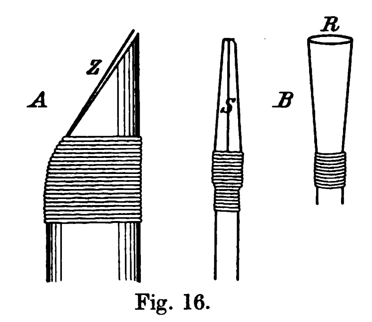


Fig. 16.

und „geschlossen". — Die Oboe und das Fagott B haben je zwei schmale, unter sehr spitzem Winkel aneinandergelagerte Holzblättchen, welche in der Längsrichtung auf ein Metallröhrchen so aufgebunden sind, daß sie dasselbe mit dem einen Ende röhrenförmig ganz umschließen, und dadurch selbst eine nach dem freien Ende hin abnehmende Wölbung erhalten. Die langen Ränder sind in dem vorderen schwingenden Teil durch einen sehr feinen Spalt S voneinander getrennt, während die freien Ränder R, über die Breite der Plättchen flach gebogen, einen spindelförmigen Spalt bilden. Die Form dieses Spaltes rechtfertigt wohl die Annahme, daß dieselben während der Schwingungen der „Blättchen" ebenfalls nur „verengert" und „erweitert" werden, d. h. nicht gegeneinander schlagen. — Bei den Trompeten werden die Zungen durch die Lippen des Bläsers vertreten. Ich habe die Schwingungen der letzteren bei einem Trompetenbläser durch ein Trompeten-Mundstück, dem ein Glaszylinder als Ansatzrohr diente, stroboskopisch untersucht und gefunden, daß die Lippen bei stoßendem Ton gegeneinander schlugen, also den Lippenspalt vollständig schlossen, während beim weichen hauchenden Ton kein völliger Lippenschluß zustande kam, sondern nur eine Verengerung und Erweiterung des Lippenspaltes stattfand[1]).

Bei diesen Instrumenten mit weichen Zungen wird die Tonhöhe wesentlich durch die Länge des Rohres bestimmt, die für eine größere Tonreihe dadurch variabel gemacht ist, daß an den Seiten des Rohres in für die einzelnen Töne bestimmten Abständen Löcher angebracht sind, welche mit den Fingern direkt oder mit Hilfe von Klappen geöffnet und geschlossen werden können. Da bei den weichen Zungen, wie bei den aufschlagenden metallenen, die Zahl der Zungenschwingungen von der Länge der Luftsäule abhängt, so gilt auch hier in bezug auf die Verstärkung des Blasestroms das für die Luftsäulen bzw. Flötenpfeifen bestehende Gesetz: der Ton wird durch zunehmende Windstärke erhöht.

Die „durchschlagenden" Zungen sind in ihrer Schwingungszahl unabhängig von der Länge des Ansatzrohres, weil sie, wie bereits erwähnt, durch ihre größere Masse eigenes Beharrungsvermögen besitzen und damit die Zahl ihrer Schwingungen auf gleicher Höhe erhalten. Sie lassen sich deshalb durch verstärktes An-

---

[1]) A. Musehold, Archiv f. Laryng. u. Rinolog. Bd. VII, 1898, S. 19.

blasen in ihrer Tonhöhe nicht beeinflussen. Diese Eigenschaft macht es möglich, den mit durchschlagenden Zungen erzeugten Klängen durch Änderung der Windstärke den erwünschten Wechsel im musikalischen Ausdruck zu geben. Die durchschlagenden Zungen haben deshalb ausschließliche Verwendung in der Greniéschen Expressiv-Orgel (1810), dem heutigen Harmonium, gefunden, und zwar ohne eigentliches Ansatzrohr und ohne Stiefel.

Die Zungen im Harmonium sind horizontal auf der unteren Fläche eines Brettes, des sogenannten Stimmstocks, befestigt. Über jeder Zunge befindet sich im Stimmstock ein längliches Loch: die „Cancelle", die auf der oberen Seite des Stimmstocks mit einem durch die Tasten entfernbaren Ventil verschlossen ist. Unter den Zungen bzw. dem Stimmstock liegt unmittelbar die mit komprimierter Luft angefüllte Windlade, welche in mehrere einer bestimmten Zahl von Zungen dienende Windkammern geteilt ist. Das Fehlen eines eigentlichen Ansatzrohres bringt es mit sich, daß die Harmoniumklänge im Vergleich zur Orgel mehr Obertöne haben. Gleichwohl bietet doch das Harmonium einen reichen Wechsel von wohlklingenden Klangfarben. Die letzteren werden durch verschiedene Gestaltung der Cancellen und die Form der Zungen so charakteristisch variiert, daß das Harmonium heute ebenfalls ein Orchester darstellt, in dem die Klänge der Blas-Instrumente, sogar der Streich-Instrumente und selbst der menschlichen Stimme vertreten sind. Letztere erreicht jedoch nicht die Vollkommenheit wie in der Orgel, weil hier für diese Stimme die Kombination von Zungenpfeifen mit weichklingenden Flötenpfeifen zur Verfügung steht. In der Orgel wird nämlich die menschliche Stimme nachgeahmt zunächst durch eine weiche aufschlagende Zungenpfeife mit einem oben zylindrischen, unten kegelförmigen Ansatzrohr, welches zum Teil gedeckt ist. Gleichzeitig aber ertönt eine den Grundton der Zungenpfeife verstärkende sanfte, leicht tremulierende gedeckte Flötenpfeife. Diese Orgelpfeifen sind zweckentsprechend möglichst tief im Innern der Orgel und dort auch noch in einem eigenen Kasten aufgestellt, dessen Deckel zur Verstärkung oder Dämpfung des Klanges vom Spieler mechanisch beliebig gehoben oder gesenkt werden kann. Durch diese künstliche Fernlegung der Pfeifen wird der Klang echoartig und erhält etwas von dem seelischen Gepräge der weichen menschlichen Stimme.

Viertes Kapitel.

Das menschliche Stimmorgan — Seine Lage — Vergleich mit den Zungenpfeifen der Orgel — Das geteilte Ansatzrohr — Anatomie und Physiologie des Mundkanals — Die Vokalbildung — Größe der Mundöffnung und des Raum-Inhaltes der Mundhöhle bei den einzelnen Vokalen — Experimentelle Erzeugung von vokalähnlichen Klängen durch Willis.

Wenn es der Kunst gelungen ist, durch die Kombination zweier im Prinzip verschiedener Instrumente, der Zungen- und der Flötenpfeife, die menschliche Stimme in immerhin erstaunlichem Grade nachzuahmen, so gestattet doch diese Tatsache an sich ohne weiteres nicht den Rückschluß auf eine Ähnlichkeit der mechanischen Vorgänge in den Orgelpfeifen mit denen des menschlichen Stimmorgans. Sie beweist nur die Möglichkeit, verschiedene Klangfarben so zu mischen, daß ein der menschlichen Stimme ähnlicher Klang zustande kommt. Während aber bei der Orgel zu diesem Zweck verschiedene Instrumente erforderlich sind, um ihre Klangfarben zu vereinigen, und noch andere derselben Gattung, welche die für den seelischen Ausdruck notwendige Schattierung der Tonstärke bewirken, hat das menschliche Stimmorgan die hervorragende Eigenschaft, dies alles in unerreichtem Grade allein, in einem Instrumente, zu leisten. Diese Eigentümlichkeit ist selbstverständlich nicht nur in der Mechanik des Stimmorgans, sondern auch dadurch begründet, daß die menschliche Stimme eine Betätigung des Lebens ist, welche die Aufgabe hat, unserem Denken und Empfinden durch willkürliche Erzeugung von Schallwellen einen akustischen Ausdruck zu verleihen.

Diesem Zwecke wunderbar entsprechend ist das ganze Stimmorgan eingebaut in den Luftweg der Atmungsorgane, und zwar so, daß jeder Teil der letzteren auch bei der Erzeugung der Stimme tätig ist. Die Lungen bilden mit Hilfe des Brustkorbes und des die Brusthöhle nach unten abschließenden Zwerchfelles den Blasebalg. Da ihre Oberfläche den Wandungen der Brusthöhle luftdicht anliegt, so folgen sie den Bewegungen der letzteren. Mit der Ausdehnung der Brusthöhle durch die Atemmuskeln saugen oder atmen die Lungen durch die Nase oder den Mund, den Rachen, Kehlkopf und die Luftröhre Luft ein. Auf demselben Wege wird die eingeatmete Luft durch Verengerung der Brusthöhle wieder ausgeatmet. Für die Atmung vollziehen sich diese Bewegungen

regelmäßig und automatisch. Zur Stimmgebung aber wird die Tätigkeit der Atemmuskeln durch den Willen so beeinflußt, daß die für den beabsichtigten Ausdruck der Stimme notwendige Luft in genügender Menge eingeatmet und mit willkürlichem, vom „fortissimo" bis „pianissimo" wechselnden Druck ausgeatmet werden kann. Die ausgeatmete Luft ist die treibende Kraft,

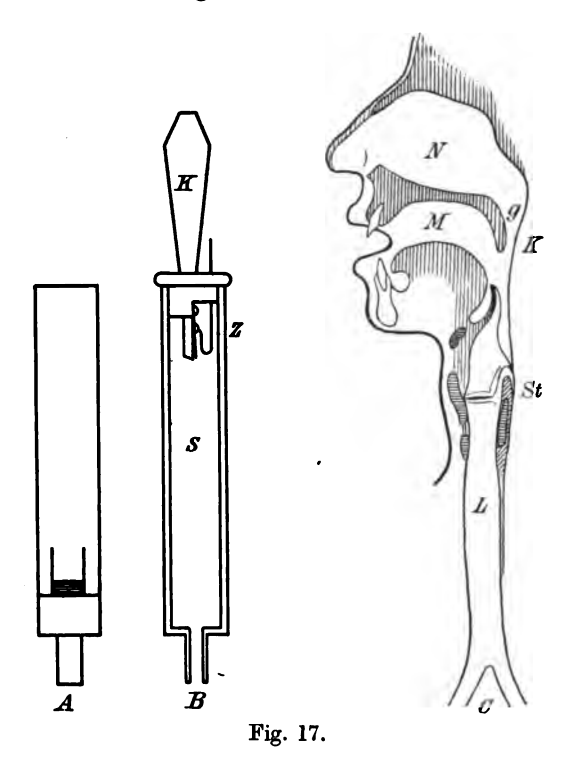


Fig. 17.

welche den tonerzeugenden Mechanismus: die Stimmlippen des Kehlkopfes, in Schwingungen versetzt, und gleichzeitig das tönende Medium, wie der Windstrom bei den Zungenpfeifen.

Der Kehlkopf ist der Luftröhre gewissermaßen als Kopf aufgesetzt und bildet gleichzeitig die Eingangspforte zu den unteren Luftwegen: der Luftröhre und den Lungen. Die über ihm befindlichen oberen Luftwege: der Rachen, die Mund- und Nasenhöhle, dienen als Ansatzrohr. Wenn man diese Teile des menschlichen

Stimmorgans und ihre Anordnung mit den Flöten- und Zungenpfeifen vergleicht (Fig. 17), so fällt schon äußerlich eine merkwürdige Übereinstimmung in der mechanischen Anordnung der einzelnen Teile mit der Zungenpfeife auf. Die letztere besteht aus einem mehr oder weniger langen Rohr — kürzer bei den aufschlagenden, länger bei den durchschlagenden Zungen —, dem „Stiefel S“, an dessen Kopfende sich der tonerzeugende Zungenmechanismus und darüber der Schallkörper K als Ansatzrohr befindet. Dieselbe Anordnung zeigt auffallend ähnlich auch der menschliche Stimmapparat: unten nächst dem Luftbalg, den Lungen, ein langes Rohr, die Luftröhre L, die an ihrem Kopfende den tonerzeugenden Mechanismus — den Kehlkopf mit den Stimmlippen St — trägt. Die über dem letzteren gelegenen Mund-, Nasen- und Rachenhöhle entsprechen dem Ansatzrohr K. Im Prinzip also haben die Zungenpfeife und das menschliche Stimmorgan dieselben Bestandteile mit gleicher mechanischer Bedeutung. Die letzteren zeigen aber durch die Vollkommenheit des menschlichen Stimmapparates bedingte sehr bemerkenswerte Unterschiede.

Zunächst ist hier das Ansatzrohr komplizierter und kunstvoller eingerichtet, als bei der Zungenpfeife. Es besteht aus zwei übereinanderliegenden Abteilungen, welche sich unter einem annähernd rechten Winkel von dem Rachen und Nasenrachen nach vorn abzweigen. Die obere Abteilung (Fig. 17 N), bestehend aus der Nasenhöhle und dem Nasenrachenraum, läßt sich durch eine sehr zweckmäßige Klappenvorrichtung: den weichen Gaumen mit dem Zäpfchen g, willkürlich von der unteren mehr oder weniger abschließen und damit außer Funktion setzen (s. Fig. 19).

Das untere Ansatzrohr M enthält den Schlund- und Mundrachen und die Mundhöhle. Die letztere bildet den wichtigsten Teil des Ansatzrohres und hat die hervorragende Eigenschaft, daß ihre Form und ihr Rauminhalt willkürlich und in hohem Grade verändert werden kann. Nur ihre obere Begrenzung, welche sie von der Nasenhöhle trennt, der von den Zahnfortsätzen der Oberkiefer nach oben gewölbte Gaumen ist knöchern und unbeweglich, während der Mundboden und die seitlichen Wände aus Muskeln bestehen, denen größtenteils die Unterkiefer als Gerippe dienen.

Der wichtigste dieser Muskeln ist die Zunge. Sie liegt auf dem Mundboden und besteht aus zwei Arten von Muskeln, von denen die einen von benachbarten Knochen entspringen und in der

Zunge endigen, die anderen ihren Ursprung und ihr Ende in der Zunge selbst haben.

Zu den ersteren gehören:

1. der Kinn-Zungenmuskel (M. genioglossus), welcher die Zunge nach vorn und unten zieht;
2. die beiden Zungenbein-Zungenmuskeln (M. hypoglossi), welche die Zunge nach hinten herunterziehen;

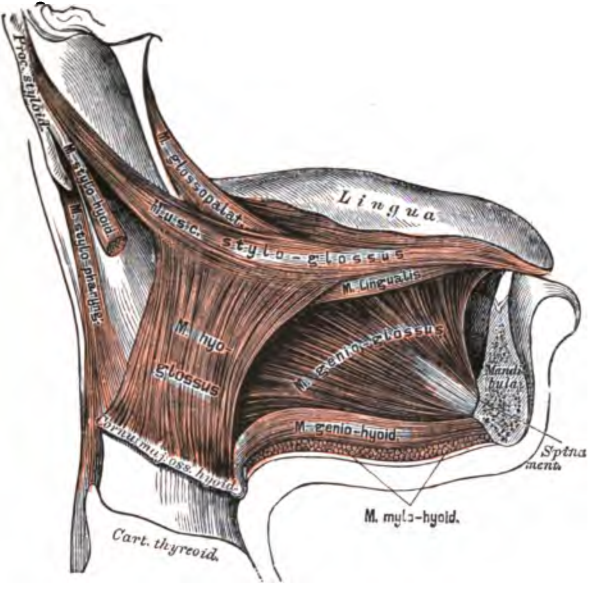


Fig. 18. Skelettmuskeln der Zunge. (Nach Heitzmann.)

3. der ebenfalls paarige Griffel-Zungenmuskel (M. styloglossus), bewegt, wenn er einseitig wirkt, die Zunge seitwärts, wenn er auf beiden Seiten tätig ist, direkt nach rückwärts.

Die anderen, die sogenannten Binnenmuskeln der Zunge, bewirken die Formveränderungen derselben und bestehen aus:

1. zwei übereinanderliegenden längsverlaufenden Schichten zur Verkürzung und Wölbung der Zunge;
2. quergerichteten Muskelfasern, welche von der in der Mitte der Zunge liegenden Scheidewand beiderseits nach aus-

und aufwärts zum Zungenrande bzw. -rücken verlaufen, um die Zunge zu verschmälern und in der Querrichtung zu wölben.

3. kommen an der Zungenspitze auch noch senkrecht von der oberen zur unteren Fläche ziehende Muskelbündel vor, welche eine Abflachung der Zunge in ihrem vorderen Teil bewirken.

Es ist leicht ersichtlich, wie verschiedene Kombinationen der Tätigkeit der Zungenmuskeln eine reiche Vielgestaltigkeit der Zunge hervorzurufen imstande sind. Dieser große Wechsel der Form der Zunge mit der Beweglichkeit des Mundbodens durch die Bewegungen des Unterkiefers, sowie die willkürliche Veränderung der Größe und Form der Mundöffnung mit Hilfe der Backen- und Lippenmuskeln, ermöglichen eine weitgehende und in vielen Abstufungen erreichbare Veränderung der Form und des Volumens der Mundhöhle. Das hat bereits Wheatstone [1]) bei seinen Untersuchungen über die Vokalklänge bewiesen, in denen er die Mundhöhle durch Raum- und Formveränderung für die Tonhöhen verschiedener Stimmgabeln als Resonator abzustimmen vermochte. Das zeigen die mit dem Munde erzeugten Pfeiftöne, welche dadurch entstehen, daß die in der Mundhöhle befindliche Luft infolge der Reibung in der Lippenenge in stehende Schwingungen versetzt wird. Ganz besonders aber läßt sich die Veränderlichkeit des Mundkanals durch ein neuerdings erfundenes Instrument [2]), die sogenannte „Wunderflöte“ nachweisen, welcher die Mechanik der Flötenpfeife zugrunde liegt. Sie wird von den Nasenlöchern angeblasen, während der „Ausschnitt“ der Pfeife auf dem mehr oder weniger geöffneten Munde liegt, so daß die Mundhöhle als „Pfeifenkörper“ fungiert. Wir haben bisher nur die zylindrischen, prismatischen und konischen Pfeifenkörper kennen gelernt und wissen, daß dort die Tonhöhe der Flötenpfeife wesentlich bedingt ist durch die Länge des Rohres. Es gibt aber auch Pfeifen, deren Dimensionen nur geringe Unterschiede aufweisen, wie die Ocarina. Bei diesen sogenannten „kubischen“ Flötenpfeifen ist nach den Versuchen von Sondhauss [3]) die Ton-

[1]) J. Grützner, Physiolog. d. Stimme u. Sprache, S. 174.

[2]) Das Instrument wird vertrieben von J. Goldstein, Berlin, Lothringer Straße 100.

[3]) Auerbach, l. c. S. 454.

höhe von der Größe ihres Volumens und ihrer Öffnungsfläche abhängig. Eine solche komplette kubische Flötenpfeife stellt die Mundhöhle mit der vor die Nasenlöcher und den geöffneten Mund gelegten Mechanik der Wunderflöte dar. Je nachdem nun der Rauminhalt der Mundhöhle vergrößert oder verkleinert wird, ist der Ton der Wunderflöte tiefer beziehungsweise höher. Andererseits bringt bei gleichem Rauminhalt der Mundhöhle die Verkleinerung der Mundöffnung eine Vertiefung, die Erweiterung derselben eine Erhöhung des Tones mit sich. Das ist dieselbe Erscheinung, wie sie Helmholtz (l. c. S. 602) auch bei seinen kugelförmigen Resonatoren festgestellt hat: durch Verengerung der freien Öffnung wurde der Ton der Resonatoren tiefer. Es ist demnach erklärlich, daß durch den Wechsel der Größe der Mundöffnung und des Volumens der Mundhöhle eine größere Reihe von Tönen erzielt werden kann. Die Versuche, die ich an mir selbst mit dieser Wunderflöte angestellt habe, ergaben, daß der tiefste Ton, den ich mit diesem Instrument hervorbringen konnte, a′, der höchste e‴ war. Zweifellos ist diese Tonbreite durch Übung noch zu erweitern und zu ergänzen.

Die Fähigkeit, der Mundhöhle ein so verschiedenes Volumen und auch der Mundöffnung eine so wechselnde Größe zu geben, daß ihre Eigentöne den Intervallen der Tonleiter entsprechen, ist uns aber nicht geläufig, weil ja die Tonhöhe der menschlichen Stimme nicht wie bei den Flötenpfeifen vom Ansatzrohr, sondern von der Spannung beziehungsweise Schwingungszahl der Stimmlippen abhängt. Der Mundkanal hat für die Stimme als Ansatzrohr dieselbe Aufgabe wie die Schallkörper der Zungenpfeifen. Von diesen wissen wir, daß sie im allgemeinen entweder in bestimmter Länge den von der Zunge erzeugten Grundton verstärken sollen oder aber in ausprobierter Länge nur gewisse zur Klangfärbung nötige Obertöne besonders hervortreten lassen. Ebenso bedingt der Wechsel der Gestalt und des Rauminhaltes des Mundkanals die charakteristischen Klangfarben der menschlichen Stimme, welche in den Vokalen

i e a o u

und ihren Kombinationen zum Ausdruck kommen. Die sich hierbei vollziehende Veränderung des Mundkanals betrifft hauptsächlich die durch die Bewegung der Zunge beeinflußten inneren Abmessungen desselben und die Größe und Gestalt der Mundöffnung.

Die Länge dieses Ansatzrohres kann den anatomischen Verhältnissen entsprechend nur geringe Unterschiede zeigen. Dieselbe ist nach Brücke [1]) bei dem Vokal **i** am kürzesten, weil der Mund stark verbreitert und damit die Mundlippen zurückgezogen werden, während sich der Kehlkopf etwas hebt. Eine allmähliche Verlängerung des Ansatzrohres zeigt sich der Reihe nach bei **e a o** und wird bei **u** am größten, weil hier die Mundöffnung röhrenförmig am meisten nach vorn geschoben und der Kehlkopf etwas herabgezogen ist.

Die weiteste Mundöffnung erfordert der Vokal **a**. Sie verkleinert sich in ihrem senkrechten Durchmesser über **e** zu **i**. Die bei **o** beginnende Vorschiebung der Lippen verkürzt den Querdurchmesser des Mundes erheblich, bei **u** wird die Mundöffnung rund und am kleinsten.

Die inneren Abmessungen der Mundhöhle zeigen, wie aus den Figuren 19 ersichtlich ist, die geringste Veränderung bei dem Vokal **a**. Bei **u** ist die Zungenwurzel nach hinten oben gegen das etwas gehobene Gaumensegel heraufgezogen, während zur Erzeugung des Vokales **i** der Zungenrücken in der Mitte dem harten Gaumen so genähert ist, daß der Mundkanal aus einer vorderen und hinteren Abteilung besteht, welche durch einen nur schmalen Spalt miteinander verbunden sind. Die Stellungen für die Vokale **o** und **e** sind hier nicht dargestellt. Sie entsprechen etwa dem Mittel zwischen a und **u** bzw. zwischen **u** und **i**.

Mit den Veränderungen der Form des Mundkanals ist begreiflicherweise auch ein entsprechender Wechsel seines Rauminhaltes verbunden. Nach Merkel [2]) ist der letztere relativ am größten bei **ä**, sodann folgen **a ö o u e ü i**. Aus diesem Verhältnis des kubischen Inhalts der Mundhöhle bei den einzelnen Vokalen kann man unschwer auch auf die relative Höhe ihrer verschiedenen Eigentöne schließen, sofern auch die Größe der Mundöffnung während der Lautierung in Betracht gezogen wird, denn, wie oben bereits gesagt ist, hängt ja der Eigenton einer kubischen Pfeife nicht nur von ihrem Volumen, sondern auch von der Größe ihrer Öffnung ab, in dem Sinne, daß eine Verkleinerung der letzteren den Ton vertieft und umgekehrt. Nach der Größe

---

[1]) Dr. Ernst Brücke, Grundzüge der Physiologie und Systematik der Sprachlaute. Wien.

[2]) Merkel, Physiologie der menschlichen Sprache, Leipzig, S. 107

der Mundöffnung folgen sich die Vokale, wie aus der obigen Beschreibung hervorgeht, von der kleinsten angefangen in der Reihe

1 2 3 4 5
u o i e a

Bezeichnen wir dieselben mit der ihnen in der Reihe zukommenden Ordnungszahl und setzen diese unter dieselben Vokale der nach dem kubischen Inhalt formierten Reihenfolge

a o u e i
5 2 1 4 3

so zeigt sich, daß bei **i** das kleinste Volumen mit relativ großer Öffnung zusammenfällt; es muß demnach die Mundhöhle bei diesem Vokal den höchsten Eigenton haben. Dann folgt **e** mit etwas größerem Rauminhalt, aber auch größerer Öffnung. **a** steht mit größtem Volumen und größter Öffnung in der Mitte. Bei **o** ist der Rauminhalt gegen **a** nur wenig verändert, aber die Mundöffnung durch die Verschiebung der Lippen erheblich verkleinert. Der Eigenton der Mundhöhle muß also bei **o** tiefer sein als bei **a** und wird bei der **u**-Stellung noch tiefer, weil die Mundöffnung sehr verkleinert ist im Verhältnis zu einer nur geringen Änderung des Volumens. Demnach würden die Vokale nach den Eigentönen der Mundhöhle, vom tiefsten angefangen, die Reihenfolge

u o a e i

haben.

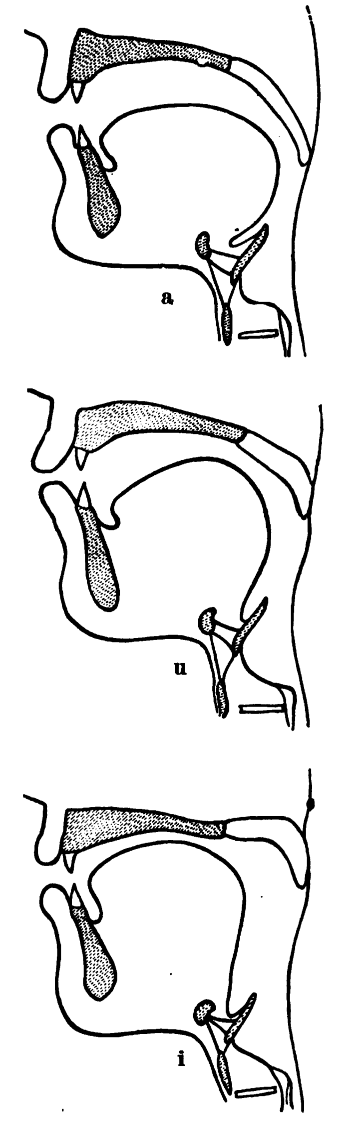


Fig. 19.
(Aus Nagel, Handbuch d. Physiol. d. Menschen Bd. IV.)

Nachdem bereits Reyher, Hellwag, v. Kempelen, Kratzenstein u. a. durch künstliche Nachahmung der Vokale die charakteristische Tonhöhe derselben festzustellen versucht hatten, ist es Willis im Jahre 1830 gelungen, die Vokalklänge durch Verlängerung bzw. Verkürzung des Ansatzrohres einer durchschlagenden Zungenpfeife künstlich zu erzeugen. Für u war die größte Länge des Ansatzrohres erforderlich, die anderen Vokale entstanden durch bestimmte Verkürzungen desselben in der soeben konstruierten Reihenfolge

u o a e i

Da mit der Verkürzung eines zylindrischen Resonanzrohres die Tonhöhe seiner Luftsäule zunimmt (s. Flötenpfeifen), so gilt diese nach den Längen des Ansatzrohres gebildete Reihenfolge auch für dessen Eigentöne und stimmt demnach mit der oben konstruierten Reihenfolge der relativen Höhen der Eigentöne der Mundhöhle überein. Willis hat aber außerdem noch festgestellt, daß der Eigenton des Ansatzrohres für jeden Vokalklang eine bestimmte und charakteristische Höhe hat, und daß auch verschieden gestaltete, als Ansatzrohr verwandte Hohlräume immer denselben Vokal ertönen ließen, sofern nur ihr Eigenton mit der für diesen Vokal gefundenen charakteristischen Tonhöhe übereinstimmte. Diese experimentell erwiesenen Tatsachen wurden voll bestätigt durch die Untersuchungen der Eigentöne der Mundhöhle selbst, welche von einer großen Reihe von Forschern gemacht sind. Es entspricht nicht dem Zwecke dieser Arbeit, auf alle Untersuchungen über diesen Gegenstand hier näher einzugehen, deshalb verweise ich auf die ausgezeichneten und erschöpfenden Darstellungen von Grützner [1]), Nagel [2]) und Gutzmann [3]). Hier sollen die Ergebnisse der Forschungen nur insoweit besprochen werden, als sie für die sich heute noch gegenüberstehenden Vokaltheorien von Helmholtz und Hermann bestimmend sind.

---

[1]) Grützner, l. c. S. 170 ff.
[2]) W. Nagel, Handbuch d. Physiol. d. Menschen, Bd. 4, S. 772 ff.
[3]) Gutzmann, Physiologie der Stimme u. Sprache, S. 72 ff.

Fünftes Kapitel.

Feststellung der Eigentöne der Mundhöhle in ihren Vokalstellungen durch Wheatstone, Donders, Helmholtz — Die Helmholtzsche Vokaltheorie — Die „Formanten"-Theorie von Hermann — Künstliche Erzeugung von Vokalen durch Willis mit einer auf einem Zahnrad schleifenden Uhrfeder — Die Tongrenzen für die deutliche Aussprache der Vokale.

Zunächst ist hervorzuheben, daß die Eigentöne der Mundhöhle bei den verschiedenen Vokalstellungen wohl in ihrer relativen Höhe die oben festgestellte Reihenfolge ergeben haben, die von den Forschern gefundenen absoluten Tonhöhen aber nicht übereinstimmen [1]. Diese Tatsache hat ihren Grund zunächst darin, daß die Untersuchungsmethoden zum Teil auf das subjektive Gehör angewiesen waren, das begreiflicherweise bei der Schätzung der Töne leicht Irrtümern ausgesetzt ist. So irrt man sich z. B. in den Fällen, wo Töne von verschiedener Klangfarbe verglichen werden sollen, leicht in der Oktave, wie Helmholtz (S. 176) selbst zugibt. Außerdem aber ist ja jeder Vokalklang auch bei demselben Individuum variabel. Dazu kommen noch die bei den verschiedenen Menschen durch Dialekt und Sprache bedingten Unterschiede der Vokalstellungen der Mundhöhle, die selbstverständlich auch ihre Eigentöne beeinflussen. Beide Umstände erklären die Tatsache, daß die von Donders [2]) und von Helmholtz gefundenen Tonhöhen erheblich voneinander abweichen. Donders hat seinen Untersuchungen die holländische Aussprache der Vokale zugrunde gelegt und die Eigentöne der Mundhöhle beim Flüstern der Vokale abgehört. Da im Flüstern, wie später noch zu erörtern ist, jede Stimmlippenschwingung ausgeschlossen ist, so wird durch den nicht schwingenden und somit tonlosen Luftstrom während der Ausatmung der Mundkanal wie ein Resonanzrohr angeblasen. Hierdurch entsteht ein Geräusch, dessen Höhe dem Eigenton der Mundhöhle entspricht, sich aber beim Abhorchen schwer schätzen läßt. Zuverlässiger ist dagegen die bereits erwähnte von Wheatstone [3]) angewandte

---

[1]) Vgl. Nagel, l. c. S. 782, Tabelle 5.

[2]) Helmholtz, l. c. S. 177.

[3]) The London and Westminster Review 1837 l. c. S. 27, u. Grützner, l. c. S. 147.

Methode, die Eigentöne der Mundhöhle in den verschiedenen Vokalstellungen mit Hilfe von vor den Mund gehaltenen Stimmgabeln festzustellen. Auf diesem Wege fand er, daß ein Vokalklang nur dann deutlich zustande kommt, wenn ein durch seine absolute Tonhöhe bestimmter Oberton des Grundtones, d. h. des Stimmtones stärker hervortritt. Die Verstärkung dieses Obertones vollzieht sich nach seiner Erklärung durch „multiple Resonanz" in der Mundhöhle, ein akustisches Phänomen, welches darin besteht, daß eine Luftmasse nicht nur dann in Mitschwingen versetzt wird, wenn ihr Eigenton mit dem erregenden Ton gleiche Höhe hat, sondern auch wenn die Schwingungszahl ihres Tones 2-, 3-, 4- usw. mal größer, also ein Oberton des erregenden Tones ist. Wheatstone ist somit der eigentliche Begründer der von Helmholtz und seinen Schülern vertretenen Oberton-Theorie der Vokalklänge. Auch Helmholtz bediente sich in seinen ausgedehnten und sehr eingehenden Studien über die Physik der Vokalklänge zuerst der Wheatstone'schen Stimmgabel-Methode. Meistens aber suchte er die Eigentöne der Mundhöhle mit seinen Resonatoren festzustellen. Zu diesem Zwecke ließ er die Vokale auf denselben Ton singen und horchte mit seinen kugelförmigen Resonatoren die Obertöne des Stimmtones ab, welche in den einzelnen Vokalklängen durch die Mundhöhlenstellung eine Verstärkung erfuhren. Dabei stellte sich heraus, daß für jeden Vokal ein oder mehrere feste, aber bei den verschiedenen Vokalen andere Töne charakteristisch waren. Diese den Eigentönen der Mundhöhle entsprechenden Töne hatten im allgemeinen bei Männern, Frauen und Kindern dieselbe Höhe, was Helmholtz (S. 171) damit erklärt, daß der kleinere Rauminhalt der weiblichen und kindlichen Mundhöhle durch Verengerung der Mundöffnung ausgleichend tiefer gestimmt wird. Wenn auch Helmholtz im allgemeinen annimmt, daß bei den Vokalklängen durch die Mundhöhle alle diejenigen Obertöne des gesungenen Tones verstärkt werden, die mit einem der Eigentöne der Mundhöhle zusammenfallen oder ihm doch nahe genug liegen, so hebt er doch andererseits hervor, daß die Luftmasse der Mundhöhle auch von solchen genügend starken Lufterschütterungen in Mitschwingen versetzt werden kann, welche nicht ganz dieselbe Schwingungsdauer haben wie ihr Eigenton (S. 182). Daher kann ein Vokalklang auch dann zustande kommen, wenn der Stimmton nicht gerade ein harmonischer

Unterton des für den jeweiligen Vokal charakteristischen Mundhöhlentones ist.

Dieser Helmholtz'schen Vokaltheorie, der trotz der letztgenannten Einschränkungen die Gesetze des Mittönens zugrunde gelegt sind, steht die Formanten-Theorie von Hermann[1]) gegenüber. Hermann erforschte die Vokalklänge mit Hilfe von Vokalkurven, welche er auf phonographischem und sehr sinnreich ausgedachten phonophotographischem Wege erhielt. Aus diesen Kurven entnahm er, daß der Charakter der fünf Hauptvokale in je einem oder mehreren relativ festen Mundhöhlen-Tönen besteht, welcher in der Periode und Intensität des Stimmtones schwebungsartig oszilliert. Diese charakteristischen Mundhöhlentöne, die er die „Formanten" des Vokales nennt, brauchten keine harmonischen Obertöne des Stimmtones zu sein, können aber zufällig mit solchen zusammenfallen. Die in der Mundhöhle befindliche Luft wird demnach durch den Stimmton nicht in ein Mittönen versetzt, sondern durch den schwingenden Strom der Ausatmungsluft erschüttert. Es wird sozusagen die Mundhöhle von dem periodisch schwingenden Luftstrom angeblasen, ähnlich wie Donders den Mundkanal zur Feststellung seiner Eigentöne bei den verschiedenen Vokalen mit der Flüsterstimme anblies. Während aber die Flüsterluft kontinuierlich wirkt, bläst der tönende Luftstrom die Mundhöhle in einzelnen seiner Periode entsprechenden Stößen an. Die Folge davon ist, daß der für den Vokal charakteristische Mundhöhlenton nicht gleichmäßig zusammenhängend schwingt, sondern durch den gesungenen Ton in mit ihm gleichzeitig oszillierende Gruppen geteilt wird, deren Zwischenräume mit der Zunahme der Tonhöhe des Stimmtones immer kleiner werden. Die Zwischenräume entsprechen den Momenten des Glottisschlusses, in denen der Mundton entweder ganz erlischt oder nur schwächer wird.

Die Theorie Hermanns lehnt sich an die weiteren interessanten Untersuchungen von Willis [2]) an, welche er zur künstlichen Erzeugung von Vokalklängen mit Hilfe von Zahnrädern anstellte. Willis ließ zu diesem Zweck eine Uhrfeder auf den

---

[1]) Hermann, Phonophotographische Untersuchungen. Archiv f. d. ges. Physiologie, Bd. 45, S. 582; Bd. 47, S. 44 u. 367.

[2]) Brücke, l. c., auch Grützner, S. 173.

Zähnen eines rotierenden Zahnrades schleifen und fand, daß der hierbei entstehende Klang bei einer gewissen Länge der Feder dem Vokal **a** glich. Wurde die Feder kürzer gespannt, dann erschienen die Vokale **e** und **i**, war sie länger als bei **a**, dann gab sie die Klänge **o u**. Dabei war es gleichgültig, ob das Zahnrad schneller oder langsamer bewegt wurde; der Klangcharakter blieb derselbe, nur die Ton- oder Klanghöhe änderte sich. Die letztere wird also bestimmt durch die Zahl der Erschütterungen, der „primären Impulse", welche die sich bewegenden Radzähne der Feder mitteilen. Sobald aber die Feder von einem Zahn abgleitet, erhält sie einen Stoß und schwingt in einer ihrer Länge entsprechenden eigenen Periode, bis sie von dem nächsten Zahn erfaßt und dadurch in ihren Schwingungen behindert wird. Diese Eigenschwingungen der Feder nennt Willis die „sekundären Impulse". Der durch diese sekundären Schwingungen bedingte Eigenton der Feder wiederholt sich also so oft, als die Feder von einem Radzahn abgleitet. Damit aber die Feder in der Zeit zwischen dem Abgleiten von einem Zahn bis zur Berührung durch den nächsten in eigener Periode schwingen kann, muß sie einen höheren Ton geben als das Zahnrad. Wenn z. B. auf diese Weise der Vokal **u** erzeugt ist, dem eine bestimmte Länge bzw. ein gewisser Eigenton der Feder entspricht, und dann die Umdrehungen des Zahnrades so weit gesteigert werden, daß der Ton des letzteren die Höhe des Eigentones der Feder erreicht, so schwindet der Vokalcharakter, weil die selbständigen sekundären Impulse der Feder zwischen den Zähnen nicht mehr zustande kommen, sondern mit den primären Impulsen zusammenfallen. Die „primären Impulse", welche das Produkt der Anzahl der Radzähne und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Zahnrades in der Sekunde sind, bestimmen die Höhe des Tones oder Klanges; von den sekundären Impulsen aber, deren Zahl lediglich durch die Länge der Feder bedingt ist, hängt die Natur des Klanges oder Vokales ab. Für die letztere ist es gleichgültig, ob die primären Pulsationen einen Rhythmus haben oder nicht, sie sind von dem Vorhandensein einer Periode der primären Impulse vollkommen unabhängig.

Diese geistreichen Beobachtungen von Willis am Experiment lassen sich unschwer auch auf die Vorgänge im Ansatzrohr des menschlichen Stimmapparates anwenden. Die Willis'schen primären Impulse finden wir rhythmisch in den durch die Schwin-

gungen der Stimmlippen bewirkten periodischen Luftstößen wieder, während sie ohne bestimmte Periode in dem durch die Flüsterstimme hervorgebrachten Reibegeräusch gegeben sind. Sowohl durch dieses letztere wie durch die periodischen Luftstöße werden die Erschütterungen der Luftmasse im Mundkanal als sekundäre Impulse hervorgerufen. Dieselben vollziehen sich bei den verschiedenen Vokalstellungen in einer der Größe und Form der Mundhöhle entsprechenden Periode, welche aber unabhängig von der Periode der primären Impulse, d. h. des gesungenen Tones ist. Daraus folgt, daß die einzelnen Vokale in der Tonleiter auf jeden Ton gesungen werden können, allerdings nur so lange, als der Stimmton eine längere Periode hat, d. h. tiefer ist, als der für den Vokal charakteristische Eigenton der Mundhöhle. So erklärt es sich, daß bei hohen Sopran-Tönen kein **u** mehr hervorgebracht werden kann, weil die Periode der die Tonhöhe bestimmenden primären Pulsationen zu kurz ist, um die für **u** charakteristischen sekundären Impulse in einzelne tönende Abteile zu zerlegen. Daher kommen die Vokale am leichtesten zum Ausdruck beim Sprechen, weil hier die Töne der „primären Impulse" relativ tief liegen. Die Männer brauchen beim Sprechen in der Regel die obere Hälfte der großen Oktave und die Frauen die obere Hälfte der kleinen Oktave (Helmholtz l. c. 183). Beim Singen in den höheren Lagen ist dagegen die Charakterisierung der Vokale schwieriger, bei den Frauen mehr, bei den Männern weniger. So wird für die Männerstimme die Aussprache des **u** bei **f′** unvollkommen; für den Sopran ist bei **f″** die Unterscheidung von **u**, **o** und **a** bereits undeutlich.

Sechstes Kapitel.

Mechanik des Gaumenschlusses — Die reinen Vokale — Das Näseln — Die sogenannten Halbvokale — Gesang mit Nasenresonanz — Objektiver Nachweis der letzteren — Nasenresonanz und Nebenhöhlen der Nase — Anatomische Lage und Größe der Mündungen der Nebenhöhlen.

Während der reinen Aussprache der Vokale ist das untere Ansatzrohr, der Mundkanal, von dem oberen, aus Nasenrachen und Nasenhöhle bestehenden vollkommen abgeschlossen. Dieser Abschluß vollzieht sich durch den weichen Gaumen mit dem Zäpfchen, der eine weiche bewegliche im Bogen nach hinten unten

gerichtete Fortsetzung des harten Gaumens bildet (s. Fig. 17g). Der weiche Gaumen besteht aus zwei Schleimhautblättern, zwischen denen flache Ansätze von Muskeln verlaufen, welche ihn heben, senken und in der Quere spannen. Ein Muskel entspringt vom hinteren Nasenstachel (Spina palatina), einem spitz vorspringenden Fortsatz am hinteren Rande des harten Gaumens, und mündet im Zäpfchen, um das letztere zu heben (M. azygos uvulae). In seiner nach hinten und im Bogen nach unten gerichteten Stellung bildet der weiche Gaumen oder das Gaumensegel gewissermaßen eine willkürlich bewegliche Klappe, welche sich nach Gutzmann[1]) sobald sie gehoben wird, unter fast rechtwinkliger Knickung des Gaumensegels oberhalb der Basis des Zäpfchens an die hintere Rachenwand anlehnt und somit den Mundkanal von dem Nasenrachen und der Nasenhöhle mehr oder weniger fest abszuschließen vermag. Beim festen Abschluß tritt gleichzeitig die Zusammenziehung der obersten Bündel (Musc. pterygopharyng.) des oberen Schlundschnürers (Constrictor pharyngis superior) hinzu, der in der Höhe des Atlas-Wirbels als ringförmiger Wulst an den Seiten und der hinteren Wand des Rachens hervorspringt (Passavant'scher Wulst). Diese doppelte Verschluß-Vorrichtung dient wohl in erster Linie dazu, beim Schlingakt den Nasenrachen so fest abzuschließen, daß der Bissen dem Druck der Zunge folgend in die Speiseröhre ausweichen muß. Außerdem aber leistet er auch bei der Stimme und Sprache wesentliche und unentbehrliche Dienste. Bei den reinen Vokalen ist der Abschluß des Mundkanals von der Nasenhöhle immer ein vollständiger, geschieht aber, wie Czermak nachgewiesen hat (Brücke, Physiol. Bd. I, 527), bei den einzelnen Vokalen mit verschiedenem Kraftaufwand. Am geringsten ist derselbe bei **a**, am stärksten bei **i**. Der Grund für diese Tatsache liegt darin, daß bei der Einstellung der Mundhöhle für **a** die tönende Luft leicht aus dem weit offenen Munde herausströmen kann; der Verschluß gegen die Nasenhöhle ist daher keinem Druck ausgesetzt und braucht nur locker zu sein. Wenn aber die Stimmluft durch einen engen Kanal hinausgetrieben wird, wie das durch die starke Wölbung des Zungenrückens nach oben beim **i** der Fall ist, so muß der weiche Gaumen mit dem Zäpfchen stärker nach oben gezogen werden,

---

[1]) Gutzmann, Stimmbildung u. Stimmpflege. 1912. S. 57.

damit die schwingende Ausatmungsluft nicht gegen die Nasenhöhle durchbrechen und die Luft derselben in Mitschwingungen versetzen kann, welche dem Vokalklange einen „näselnden" Charakter geben würden. Denn gerade bei dem Vokal **i** sind die Bedingungen für das Entstehen des „Näselns" nach der Auffassung von Grützner [1]) gegeben. Selbst ad maximum gesteigerte Nasen-Resonanz, z. B. bei einem lauten **m**, gibt noch kein „Näseln", sondern nur deutlichen „Nasenton". Das „Näseln" kommt erst dann zustande, wenn der Kehlkopf gehoben und der hintere Teil der Zunge bei offener Gaumenklappe gegen den Gaumen emporgehoben wird; dadurch ist die Kommunikation mit der Mundhöhle verkleinert und die mit den Nasenhöhlen erweitert. Infolgedessen findet in der letzteren die Resonanz so gut wie allein statt, die bei der Festigkeit der Wände die Verstärkung der höheren Obertöne (Helmholtz) begünstigt.

Die bei der Aussprache der reinen Vokale unerwünschte Beteiligung der Nasenresonanz wird physiologisch in Anspruch genommen bei den sogenannten „Halbvokalen". Es sind dies die Konsonanten **m**, **n** und **ng**. Die übrigen, eigentlichen Konsonanten werden dagegen nur bei geschlossener Gaumenklappe gebildet. Sie stellen Geräusche dar, welche dadurch entstehen, daß der Mundkanal an bestimmten, den sogenannten Artikulations-Stellen entweder geschlossen und durch die Ausatmungsluft gleich wieder gesprengt wird, oder nur eine solche Verengung erfährt, daß der Luftstrom das jedem Konsonanten charakteristische Reibegeräusch hervorbringen kann. So werden die Lippenlaute mit den Lippen erzeugt, die Zungenlaute durch die Anlehnung der Zunge an die Schneidezähne oder den vorderen Teil des Gaumens, die Gaumenlaute durch Verschluß oder Verengerung des Mundkanals mit dem mittleren oder hinteren Teil der Zunge einerseits und den entsprechenden Stellen des harten und weichen Gaumens andererseits. — Bei den **m**-, **n**- und **ng**-Lauten findet zunächst auch ein Verschluß des Mundkanals statt, und zwar bei **m** mit den Lippen, bei **n** durch Anlegen der Zunge an den vorderen Teil des Gaumens und bei **ng** durch Anlehnung des hinteren Teiles der Zunge an den weichen Gaumen. Gleichzeitig

[1]) Vgl. Grützner, Die Nasenstimme u. näselnde Stimme, S. 123. — Gutzmann, Von den verschiedenen Formen des Näselns. 1901.

aber wird die Gaumenklappe geöffnet und die durch Stimmlippenschwingungen tönende Ausatmungsluft in die Nasenhöhle gelenkt, deren Resonanz diesen Lauten den eigentümlichen Klang gibt. Da diese Konsonanten — ähnlich wie die Vokale — erst mit Hilfe der Luftschwingungen im Ansatzrohr, hier also in der Nasenhöhle, zur Wahrnehmung gelangen, so werden sie auch „Halbvokale“ genannt.

Während nun die Physiologie für die Aussprache der reinen Vokale eine Beteiligung des oberen Ansatzrohres, der Nasenhöhle, ausschließt, wird von manchen Gesangschulen angestrebt, daß zur Veredlung des gesungenen Tones ein wenn auch kleiner Teil der tönenden Ausatmungsluft gleichzeitig auch durch die Nasenhöhle streicht. Dieser durch die Nase geleitete Luftstrom ist jedoch so fein bemessen, daß seine Schwingungen sich als Nasenton dem Ohr nicht bemerkbar machen. Gleichwohl läßt sich durch ein einfaches Experiment nachweisen, ob die Nasenhöhle beim Singen eines Tones beteiligt ist oder nicht. Wenn man ein offenes Resonanzrohr anbläst und während des Anblasens das freie Ende durch allmähliche Abdeckung verengert, so wird sein Ton bekanntlich tiefer, um bei vollständigem Verschluß des freien Endes die tiefere Oktave des ursprünglichen Tones zu geben. Ferner ist oben bereits erwähnt, daß auch bei kubischen Pfeifen oder Resonanzkörpern die Tonhöhe nicht nur von dem Rauminhalt, sondern auch von der Größe der Öffnung abhängt, und zwar in dem Sinne, daß mit Verengerung der Öffnung der Ton des Resonators stärker und tiefer wird. Dieses Prinzip behält seine Geltung auch bei allen Ansatzröhren sowohl der Flöten- wie der Zungenpfeifen. Der Ton einer mir vorliegenden Orgelzungenpfeife vox humana (h) sowie einer Flötenpfeife (c'') vertieft sich bei Abdeckung des freien Endes des Ansatzrohres auf etwa die Hälfte der Öffnung um $1/2$ Ton. Beim Waldhorn wird diese Tatsache bekanntlich dazu benutzt, die zwischen den Eigentönen, dem Grundton und seinen Obertönen, liegenden Töne durch Verengerung des Schallbechers mit der Faust zu ergänzen. Ebenso haben wir oben erfahren, wie der Eigenton der Mundhöhle bei den einzelnen Vokalstellungen nicht nur von ihrem Volumen, sondern wesentlich auch von der Größe der Mundöffnung abhängt. Wird der Mundkanal für den Vokal **a** eingestellt und dann während der Tongebung der Mund willkürlich verkleinert, so vertieft sich der Ton, während er gleich-

zeitig die Klangfarbe des **o** erhält. Daß diese Vertiefung des Tones nicht etwa von der geringen Verlängerung des Mundkanals bedingt ist, welche durch das Hervortreten der Lippen bei der Abrundung der Mundöffnung zustande kommt, läßt sich leicht dadurch beweisen, daß der Ton auch dann tiefer wird, wenn die Mundöffnung während der Aussprache des **a** ohne Veränderung der Lippenstellung mit der Handfläche oder mit einer Pappscheibe teilweise verdeckt und verkleinert wird. Dieselbe Erscheinung zeigt sich auch bei dem oberen Ansatzrohr, dem Nasenrachen und der Nasenhöhle, welche durch die senkrecht verlaufende Nasenscheidewand in zwei nebeneinander verlaufende Kanäle getrennt ist. Setzt man dieses obere Ansatzrohr physiologisch in Funktion, indem man einen der Halbvokale **m** oder **n** ertönen läßt, so kann die tönende Luftsäule nur durch die Nasenlöcher nach außen gelangen, weil ja, wie bereits erwähnt ist, der Mund hierbei geschlossen ist. Sobald nun während dieser Tongebung ein Nasenloch durch Druck auf den Nasenflügel verengert oder geschlossen wird, so tritt eine merkliche Vertiefung des Tones und Änderung der Klangfarbe ein. Auf diese Tatsache hat zuerst G. Spieß[1]) in etwas modifizierter Form aufmerksam gemacht, insofern als er die Vertiefung des gesummten Tones dann bemerkte, wenn bei Verengerung einer Nasenseite die andere weitere geschlossen wurde. Gutzmann[2]), Jörgen Möller[3]) und Bukofzer[4]) konnten diese Beobachtung bestätigen, während A. Barth[3]) dieselbe, und zwar mit Recht, dahin abgeändert wissen wollte, daß die scheinbare Vertiefung des gesummten Tones auch dann eintritt, wenn bei beiderseits freier Durchgängigkeit der Nase ein Nasenloch geschlossen wird; ist jedoch die offen gelassene Seite verengt, so tritt der Unterschied in der Klanghöhe noch auffallender hervor. Während aber Barth die Veränderung des Tones nicht für eine Änderung der Tonhöhe, sondern vielmehr der Klangfarbe auffaßte, hat Bukofzer in genauer Anlehnung an die Beobachtung von Spieß experimentell nachgewiesen, daß es sich tatsächlich um eine Vertiefung des

---

[1]) Spieß, International. Zentralblatt f. Laryngol. u. Rhinologie 1902, S. 110.

[2]) Gutzmann, ebenda S. 150.

[3]) A. Barth, Jörgen Möller, ebenda S. 192.

[4]) Bukofzer, Über den Einfluß der Verengerung des Ansatzrohres auf die Höhe des gesungenen Tones. Arch. f. Ohrenheilk. B. 61, S. 104.

Tones handelt. Bukofzer konnte sich weiterhin überzeugen, daß auch bei einer Zungenpfeife — mit harter, d. h. metallener Zunge — sich durch Verengerung der Mündung des Ansatzrohres der Ton wesentlich, fast um ½ Ton, vertiefen läßt. Leider gibt er nicht an, wie weit er bei dieser Vertiefung den Schallkörper abgedeckt hat. Jedenfalls hat Bukofzer das Verdienst, den Zweifel Barths als unberechtigt erwiesen zu haben, aber die Tatsache an sich, die Vertiefung des Tones eines Resonanz- bzw. Schallkörpers bei Verkleinerung seiner Öffnung, ist eine in der Physik und im Orgelbau längst bekannte Erscheinung [1]). Gutzmann hat den Vorgang in der Nasenhöhle auf eine Stauung und daraus folgende Verlangsamung des Exspirationsstromes zurückgeführt, mit der bei gleichbleibender Spannung der Stimmlippen der Ton tiefer werden muß. Diese Erklärung ist durchaus annehmbar. Gleichwohl halte ich dieselbe nicht für erschöpfend. Der Exspirationsstrom als solcher kann für die beschriebene Erscheinung nicht allein ausschlaggebend sein, denn auch bei ruhenden Luftsäulen, z. B. in den Resonatoren, zeigt sich ebenfalls eine Vertiefung des Tones, sobald ihre Mündung verkleinert wird. Es ist deshalb wahrscheinlich, daß der wesentliche Grund nicht so sehr in der Verlangsamung des Exspirationsstromes als vielmehr in der Behinderung der freien Schwingungen der Luftteilchen an der Mündung zu suchen ist.

Ich habe meine Ansicht, daß es sich bei dem genannten Phänomen um denselben Vorgang wie bei der Abdeckung der Pfeifen bzw. Resonanzkörper handelt, dadurch bestätigt gefunden, daß die hörbare Vertiefung des Tones und Änderung seiner Klangfarbe bei einseitiger Nasenverschließung auch dann eintritt, wenn die reinen Vokale mit kaum wahrnehmbarer schwacher Nasenresonanz, d. h. mit nur leicht geöffneter Gaumenklappe intoniert werden. Ich habe eine geschulte Sängerin (Sopran) verschiedene Töne auf den reinen Vokal **a** physiologisch singen lassen und dabei die Nasenlöcher in der angegebenen Weise abwechselnd verengert oder geschlossen. Es ergab sich, daß die Sängerin dadurch keinen Unterschied und keine Störung in der Tongebung empfand, sowie auch die Zuhörer eine Veränderung des Tones nicht wahr-

---

[1]) Vgl. Helmholtz, l. c. S. 167 u. 632. — Auerbach, Akustik, S. 425, 454.

nehmen konnten. Die Töne blieben bei verengerten und auch ganz geschlossenen Nasenlöchern gleich, — selbstverständlich, weil die Nasenresonanz durch den vollständigen Gaumenschluß unmöglich gemacht war. Darauf wurden dieselben Töne auf ü gesungen, und zwar mit feiner Nasenresonanz, aber so, daß der Ton wohl weicher klang, ein nasales Timbre jedoch nicht wahrnehmbar war. Wenn jetzt ein Nasenloch verengt oder geschlossen wurde, so vertiefte sich der Ton und nahm dabei deutlich den Charakter eines „Nasentones" an, als Beweis, daß nun wirklich die tönende Ausatmungsluft nicht nur durch den Mundkanal allein, sondern gleichzeitig auch durch die Nasenhöhle strömte. Demnach kann im Kunstgesange, auch objektiv nachweisbar, bei den sogenannten reinen Vokalen — wahrscheinlich leichter bei denen, welche in der Aussprache nur einen lockeren Gaumenschluß erfordern — außer der wesentlichen den Vokalklang bedingenden Funktion des Mundkanals gleichzeitig auch die Nasenhöhle klangfärbend tätig sein. Die unerläßliche Voraussetzung für die Mitwirkung des Nasenkanals bei der Tonbildung ist aber die Verhinderung des „Gaumenschlusses", damit die über dem Kehlkopf befindliche und bewegte Luftsäule, welche zum größten Teil durch die Mundhöhle strömt, gleichzeitig und in geringer Menge durch die Nasenhöhle ihren Weg nimmt. Die Möglichkeit einer anderen wirksamen, d. h. die Tonstärke oder die Klangfarbe beeinflussenden Nasenresonanz, etwa in der Weise, daß bei geschlossener Gaumenklappe die Schwingungen in der Mundhöhle durch Vermittlung des harten Gaumens die Luft in der Nasenhöhle zum Mittönen veranlassen, ist nach dem obigen Versuche ausgeschlossen, denn dann müßte auch bei geschlossener Gaumenklappe die Verengerung und Verschließung eines oder beider Nasenlöcher eine Veränderung des gesungenen Tones herbeiführen, was aber tatsächlich nicht der Fall ist. Gleichwohl ist, wie ich mich durch Auskultation der Nasenhöhle mittels eines in die Nase tief eingeschobenen Rohres überzeugen konnte, auch bei geschlossener Gaumenklappe während des Intonierens der fünf Hauptvokale ein Tönen in der Nase deutlich hörbar. Es wird also die in der Nase „ruhende" Luft, wahrscheinlich durch Vermittlung des Gaumens erschüttert, aber ihre Schwingungen sind zu schwach, um den Ton der aus dem Mundkanal strömenden, „bewegten" Luft irgendwie zu beeinflussen.

Die Tatsache, daß auch die physiologisch reinen Vokale in gewissem Grade unter gleichzeitiger Beteiligung der Nasenhöhle gesungen werden können, und die Annahme, daß die Klangfarbe der gesungenen Töne durch die Nasenresonanz vorteilhaft beeinflußt wird, hat die Gesang-Lehrer wie -Schüler vielfach zu irrigen Vorstellungen über die physikalisch-musikalische Bewertung der Nasenhöhle veranlaßt. Die letztere ist in bezug auf ihre Funktion als Ansatzrohr — trotz ihrer Teilung durch die Nasenscheidewand in zwei nebeneinanderliegende Hälften — durchaus als ein Raum aufzufassen. Dafür spricht auch die leicht nachzuweisende Tatsache, daß z. B. bei einer Flötenpfeife, deren Resonanzrohr gewissermaßen mathematisch bemessene Dimensionen hat, die Einschiebung einer Scheidewand bis an die obere Kante des Aufschnittes auf den Ton gar keinen Einfluß hat. Durch die Nasenhöhle strömt, sobald während des Gesanges die „Gaumenklappe“ geöffnet ist, ein verhältnismäßig nur kleiner Teil der tönenden Ausatmungsluft, um sich beim Entweichen aus den nach unten gerichteten Nasenlöchern mit dem aus der Mundhöhle kommenden Luftstrom zu vereinigen und ihm seine Klangfarbe mitzuteilen. Während also bei diesem Vorgange einzig und allein die Bewegung des weichen Gaumens mit dem Zäpfchen zur Bemessung des durch die Nase zu leitenden Luftstroms willkürlich reguliert werden kann, ist das weitere Verhalten des Luftstromes in der Nasenhöhle einer Beeinflussung durch den Willen vollkommen entzogen. In der Nasenhöhle befinden sich keine Vorrichtungen, die willkürlich verändert werden könnten, sie ist ein starrwandiges Ansatzrohr, das mit weichen Schleimhautgebilden ausgekleidet ist. Und doch hört man leider nur zu oft die Forderung aussprechen, daß die Nasenresonanz an bestimmten Stellen der Nasenhöhle bzw. in den Nebenhöhlen derselben willkürlich angestrebt werden soll. Vor allem müssen hierbei die Stirnhöhlen herhalten. Ja, in einer musikalischen Zeitung fand ich sogar die Behauptung, daß die Nasenresonanz in die Siebbeinhöhlen verlegt werden müsse[1]). Abgesehen davon, daß es unmöglich ist, den in die Nase geleiteten Luftstrom an eine bestimmte Stelle der Nasenhöhle zu dirigieren, lassen die anatomischen Verhältnisse

[1]) Vgl. auch Merkel, Anatomie u. Physiol. d. m. Stimm- u. Sprachorgans, S. 633.

der Nase darauf schließen, daß die Nebenhöhlen der Nase nicht imstande sind, durch den vibrierenden Luftstrom der Nasenhöhle in Resonanz versetzt zu werden und somit die Klangfarbe des gesungenen Tones zu beeinflussen. Ein Blick auf die Fig. 20, welche die für die Lage der Nebenhöhlen wesentlich in Frage kommende laterale und obere Wand der Nasenhöhle, und zwar ihrer rechten Hälfte, darstellt, zeigt, daß von den Zugängen zu den Nebenhöhlen der Nase nur der zu der im Durchschnitt getroffenen Keilbeinhöhle K sichtbar ist. Im übrigen bemerkt man nur die obere O, mittlere M und untere Nasenmuschel U, welche als von der äußeren Wand der Nasenhöhle ausgehende Knochenfalten nach unten innen gerichtet und mit Schwellgewebe und Schleimhaut überzogen sind. Von der mittleren Muschel M verdeckt, liegen im mittleren Nasengange die in Nischen versenkten Eingänge zu der Stirnhöhle F, dem vorderen Siebbein-Labyrinth B und zur Oberkieferhöhle C (Fig. 21). Am meisten nach vorn befindet sich die Öffnung A zur Stirnhöhle F, im oberen Teile eines von vorn oben nach hinten unten gebogen verlaufenden Halbkanals (Infundibulum I) so verborgen, daß sie nach Juracz [1]) sehr

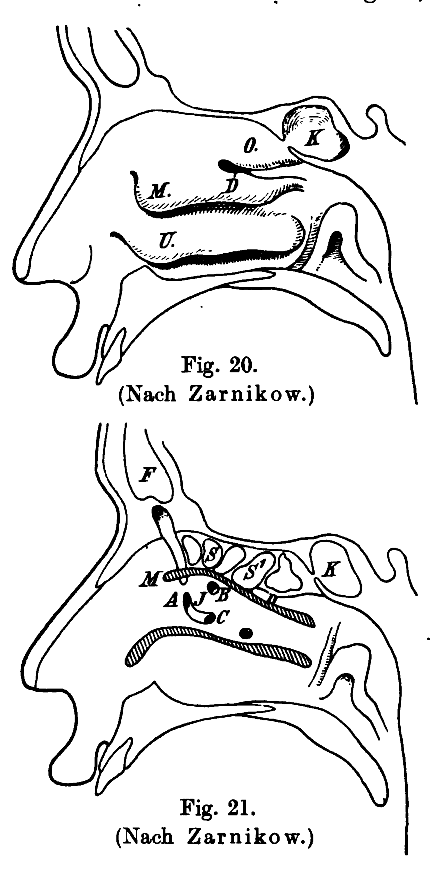


Fig. 20.
(Nach Zarnikow.)

Fig. 21.
(Nach Zarnikow.)

[1]) Juracz, Berl. klin. Wochenschr. 1887.

häufig, nach Hajek [1]) in der Hälfte der untersuchten Fälle mit der Sonde nicht gefunden werden kann. Ihre Weite ist in verschiedenen Fällen sehr ungleich; einmal ist sie weit, 3—4 mm, andermal viel enger und bildet zuweilen einen Kanal von mehreren Millimetern Länge. Die Zellen des vorderen Siebbein-Labyrinths S haben zuweilen separate Ausführungsgänge, in andern Fällen vereinigen sich mehrere Ausführungsgänge vor ihrer Mündung zu einer gemeinschaftlichen Öffnung. Am konstantesten ist die Öffnung im Winkel zwischen der bulla ethmoidalis und der mittleren Muschel M (Fig. 21 B), also dicht unter dem Ansatz der mittleren Muschel. — Die Mündung der Oberkieferhöhle liegt in einer kleinen Bucht am unteren Ende des Infundibulums (C) verborgen und wechselt in der Größe außerordentlich. Doch ist sie nach Hajek selten so weit, daß man ohne weiteres mit einer mehrere Millimeter dicken Sonde in die Kieferhöhle eindringen kann. — Das hintere Siebbein-Labyrinth S′ hat seine Ausführungsgänge in der Enge des oberen Nasenganges D, während die Mündung der Keilbeinhöhle noch höher und verborgener liegt. Außer diesen anatomischen Verhältnissen ist noch die Tatsache zu erwägen, daß die genannten Mündungen der Nebenhöhlen der Nase wirkliche Ausführungsgänge für den in den Höhlen produzierten Schleim sind. Es ist deshalb anzunehmen, daß die genannten Öffnungen meist durch Schleim mehr oder weniger verlegt sind und somit die Nebenhöhlen von einer akustischen Beteiligung an den Schwingungen des Luftstroms der Nasenhöhle ausschließen. Zu diesem Resultat kommt auch Gießwein [2]) nach seinen sehr eingehenden Untersuchungen, die er über die Resonanz der Nasenräume, insbesondere der Nebenhöhlen der Nase angestellt hat. „Die versteckte Lage der Mündungen der Nebenhöhlen und vor allem ihre geringe Größe, die sich bei katarrhalischen Zuständen noch vermindert, so daß praktisch genommen die Nebenhöhlen zum in sich geschlossenen Resonator werden, zu dem also die Tonwellen keinen Zutritt haben würden —, lassen auch die Annahme, die Nebenhöhlen könnten als regel-

---

[1]) Hajek, Pathol. u. Therapie der entzündl. Erkrankungen der Nebenhöhlen d. Nase. Wien 1899.

[2]) M. Giesswein, Über die Resonanz der Mundhöhle u. d. Nasenräume, im besonderen der Nebenhöhlen der Nase. Passow u. Schäfer, Beiträge z. Anatomie usw. d. Ohres, d. Nase u. d. Halses. Bd. IV, 1911.

rechter Resonator aus dem Gesamtklange Töne herausheben und verstärken, im höchsten Grade unwahrscheinlich werden. — Dem entspricht auch die klinische Erfahrung, daß bei Vereiterung der Nebenhöhlen keine Ausfallserscheinungen oder Beeinträchtigungen der Stimme oder Sprache eintreten, die nicht in anderen Verhältnissen, z. B. Einengung der Nasenhöhle durch die stark geschwollene Schleimhaut, ihren Grund hätten."

Siebentes Kapitel.

Anatomie des Kehlkopfes — Sein Knorpelgerüst — Lage der Stimmlippen — Die zur Bewegung und Spannung der Stimmlippen dienenden Muskeln — Der Mechanismus für die Atmungs- und Stimmstellung der Stimmlippen — Mechanik der äußeren Spannung der Stimmlippen durch die Spannmuskeln (Musc. crico-thyreoid.).

So zweifellos und in die Augen springend auch die Übereinstimmung der Funktionen der einzelnen Teile des menschlichen Stimmorgans und derer der Zungenpfeifen ist, so zeigt doch der Vergleich der entsprechenden tonerzeugenden Mechanismen Unterschiede, welche der Einreihung der menschlichen Stimmlippen in die „Zungen" in mechanischem Sinne gewisse Schwierigkeiten entgegenstellen. Die Zungen der bekannten Blasinstrumente sind, wie bereits erwähnt, schmale mehr oder weniger lange Blättchen, die an dem schmalen Ende befestigt sind, so daß sie wie an einem Ende eingeklemmte Stäbe transversal schwingen können. Wo sie paarig zusammengefügt Anwendung finden, wie bei der Oboe und dem Fagott, sind sie mit ihrem freien Ende unter sehr spitzem Winkel gegeneinander gestellt, so daß sie einen schmalen spindelförmigen Spalt zwischen sich freilassen. Auf diese Weise sind sie dem Blasestrom entgegengestellt und schwingen demnach „einschlagend". Dabei „verengern" und „öffnen" sie den Spalt ebenso wie die einzüngige Klarinette, während die ebenfalls einfachen Zungen der Orgelpfeifen den Rahmenschlitz „öffnen" und „schließen". Die menschlichen Stimmlippen bilden nun auch ein paariges System, gleichen aber weder den Plättchen der Zungenpfeifen noch den vielfach zum Vergleich herangezogenen Membranen. Sie sind vielmehr Lippen im wahren Sinne des Wortes und unterscheiden sich von unseren Mundlippen nur durch die Dimensionen und

Gestalt. Gleichwohl aber werden sie den Zungeninstrumenten eingereiht, da die Physik den Begriff der Zungen in akustisch-musikalischem Sinne etwas weit faßt. Nach Auerbach (S. 464) versteht man unter einer Zunge in akustischem Sinne eine Vorrichtung, „durch deren periodische Bewegung der Durchtritt eines Luftstromes von einem Raume in einen anderen periodisch ermöglicht und unterbrochen wird, und zwar in so raschem Tempo, daß Tonschwingungen entstehen. Es handelt sich also hier um eine Tonerzeugung, ganz ähnlich wie bei den Sirenen, nur

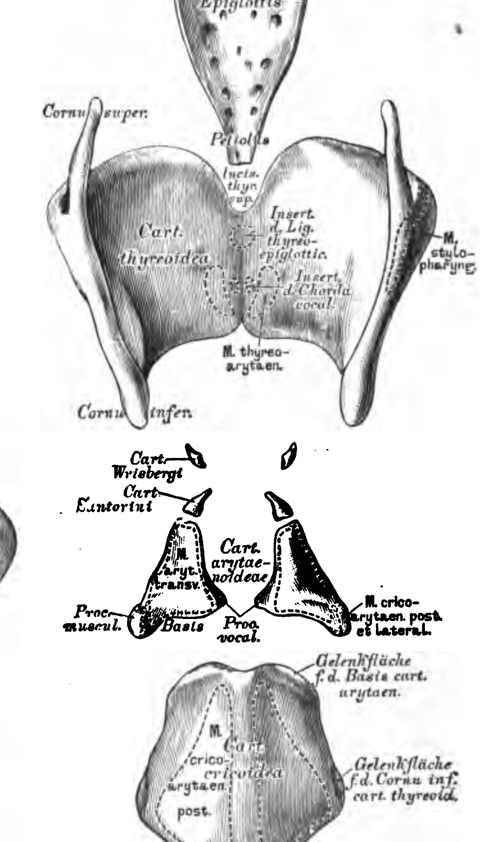


Fig. 22.
Das Knorpelgerüst des Kehlkopfes. (Nach Heitzmann.)

daß die Bewegung hier nicht rotierenden sondern schwingenden Charakters ist.“

Die Lage der Stimmlippen am Eingang der Luftröhre erfordert Vorrichtungen, welche die Stimmlippen so weit auseinander halten, daß die Atmungsluft in genügender Menge durch den Kehlkopf strömen kann. Andererseits erheischt aber ihre Bestimmung als Stimmorgan, daß sie für die Stimmgebung genügend einander genähert und gespannt werden, damit sie durch die Kraft des ausgeatmeten Luftstroms in tonerzeugende Schwingungen geraten können. Diese für die Atmung und die Stimme nötigen Bewegungen vollziehen sich durch Vermittlung der drei Kehlkopfknorpel, an die sich die Enden der Stimmlippen ansetzen: des Schildknorpels und der beiden Gießbeckenknorpel (Fig. 22). Zu diesem Zweck sind diese drei Knorpel auf den Ringknorpel aufgesetzt und mit ihm durch Gelenke beweglich verbunden. Der Ringknorpel, cartilago cricoidea, dient ihnen gewissermaßen als Postament und wird deshalb von C. Ludwig der „Grundknorpel" des Kehlkopfes genannt. Er gleicht einer kurzen Röhre mit einer Weite, die etwa derjenigen der Luftröhre entspricht. Das untere Ende dieser Röhre ist horizontal abgeschnitten und in seinem ganzen Umfange mit dem obersten Luftröhrenknorpel verbunden. Ihr oberes Ende hat einen von hinten oben nach vorn unten schräg verlaufenden und ausgeschweiften Rand, so daß die Höhe des Ringknorpels vorn etwa 7 mm, hinten 18—23 mm beträgt (Luschka). Da man von alters her den so gestalteten Ringknorpel mit einem liegenden Siegelring verglichen hat, so wird der nach hinten gerichtete hohe Teil „die Platte", der vordere, niedrige Abschnitt „der Bogen" genannt. Die Platte hat dadurch, daß einzelne Teile der Außenfläche des Ringknorpels etwas hervorspringen, eine ungleich sechseckige, aber symmetrische Gestalt. Auf den beiden oberen Ecken befindet sich je ein in der Richtung des Plattenrandes ovales, nach außen und unten abfallendes Hügelchen, welches mit der Grundfläche des zugehörigen Gießbeckenknorpels ein frei bewegliches Gelenk bildet. Ungefähr an den mittleren Ecken der Platte liegt ebenfalls je eine, aber kleinere und rundliche Gelenkfläche zur Verbindung mit den unteren Hörnern (cornu infer.) des Schildknorpels.

Der Schildknorpel (cartilago thyreoidea) besteht aus zwei unregelmäßig viereckigen Knorpelplatten, deren vordere Ränder durch Vermittlung eines schmalen Mittelstückes unter einem

Winkel von etwa 90⁰ beim Manne und etwa 120⁰ beim Weibe miteinander verwachsen sind. Der obere Rand jeder Platte ist nach vorn abgerundet, so daß dadurch im Winkel des Schildknorpels ein tiefer Einschnitt a (incisura thyreoidea superior) entsteht. Ein ähnlicher, aber weniger tiefer Einschnitt wird durch die nach vorn oben abgebogenen unteren Ränder gebildet. Die

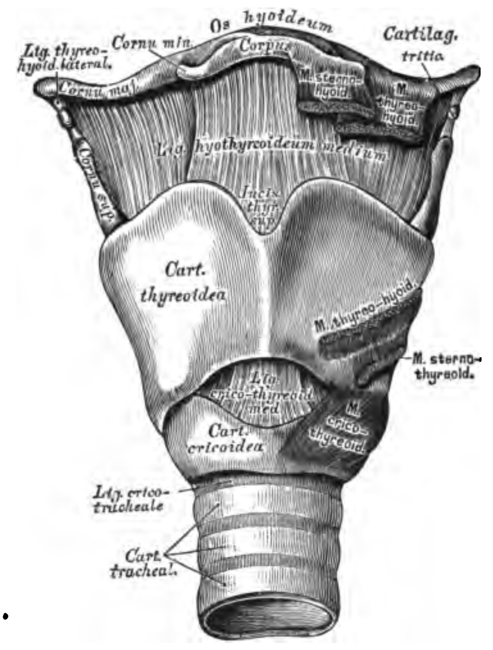
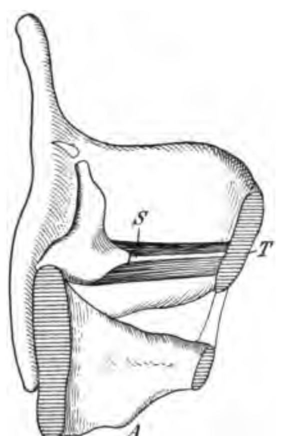


Fig. 23. Der Kehlkopf mit den Muskelansätzen.
(Ansicht von vorn. Nach Heitzmann.)

oberen Ränder sind länger als die unteren, so daß der obere Teil des Schildknorpels in der vorderen Halsgegend sich als Vorsprung — der sogenannte Adamsapfel — besonders bei zurückgebeugtem Kopfe bemerkbar macht. Der hintere Rand jeder Platte verläuft annähernd gerade und senkrecht und ist nach oben zu dem längeren oberen Horn (cornu majus), nach unten zu dem kürzeren unteren Horn (cornu inferius) ausgezogen. Die oberen Hörner sind durch je ein strangförmiges Band (ligamentum thyreo-hyoideum laterale) mit den großen Zungenbeinhörnern,

der ganze obere Rand des Schildknorpels durch membranartige Bandmassen (ligam. thyr.-hyoid. med.) mit dem unteren Rand des ganzen Zungenbeins verbunden. Ebenso ist der Raum zwischen dem unteren Schildknorpelrande und dem Ringknorpel durch ein breites Band (ligam. cricothyreoid. medium) ausgefüllt, während die unteren Hörner durch Kapselbänder (lig. cric.-thyreoid. later.) mit den unteren Gelenkflächen am Ringknorpel zu je einem Gelenk vereinigt sind (Fig. 23 u. 22).

Dicht unter dem oberen Einschnitt ist im Winkel des Schildknorpels durch ein starkes Band (lig. thyreo-epiglotticum) der Stiel des Kehldeckels (Epiglottis) befestigt, der aus sehr elastischem nie verknöchernden Knorpel besteht und die Gestalt eines herzförmigen oben abgerundeten Blattes hat. Unterhalb des Kehldeckelstieles befindet sich, ebenfalls im Winkel des Schildknorpels, ein von verästigten Bindegewebskörperchen durchsetzter



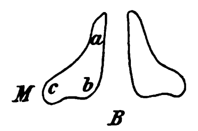


Fig. 24. (A nach Rauber-Kopsch.)

Faserwulst, mit dem die vorderen Enden der Stimmlippen dicht nebeneinander verwachsen sind. Die hinteren Enden der Stimmlippen setzen sich jederseits an den Stimmfortsatz des zugehörigen Gießbeckenknorpels an (Fig. 24A, S—T).

Die Gestalt der beiden Gießbeckenknorpel gleicht etwa je einer dreiseitigen, nach der Mittellinie des Körpers etwas gekrümmten Pyramide mit einer inneren, dem anderen Knorpel zugekehrten Fläche, einer äußeren, geschweiften nach vorn außen gerichteten und einer hinteren ebenfalls konkaven Fläche. Dementsprechend haben die beiden Knorpel, wie aus der nebenstehenden Fig. 24B ersichtlich ist, die einen horizontalen Querschnitt durch den unteren Teil der Knorpel darstellt, einen

vorderen Rand a, einen hinteren inneren b und einen hinteren äußeren c. Der vordere Rand ist nach vorn zu dem ziemlich spitzen, nach oben mäßig gekrümmten Stimmfortsatz s (processus vocalis) ausgezogen. Der hintere äußere Rand endet in dem kürzeren, aber stärkeren, etwas nach hinten gerichteten Muskelfortsatz M (processus muscularis). Der hintere innere Rand ist stumpf abgerundet. Die nach vorn gerichteten Stimmfortsätze dienen, wie bereits erwähnt, den hinteren Enden der Stimmlippen als Ansatzpunkte. An den Muskelfortsätzen sind die Muskeln befestigt, deren Aufgabe es ist, den Stimmlippen die für die Atmung und Stimme nötige Stellung zu geben. Da diese Bewegung nur durch Vermittlung der Gießbeckenknorpel möglich ist, so haben die letzteren von C. Ludwig den ihrem mechanischen Zweck sehr entsprechenden Namen „Stellknorpel" erhalten.



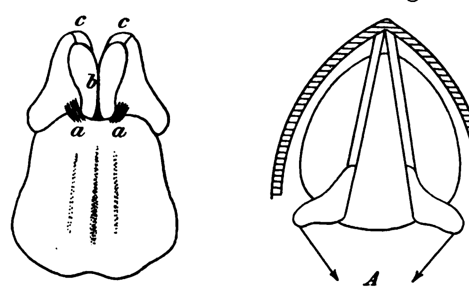
Fig. 25.

Die Bewegungen der „Stellknorpel" geschehen in je einem Glenke auf dem oberen Rande der Platte des Ringknorpels. Die Gelenkfläche der Stellknorpel befindet sich ungefähr an der hinteren Hälfte ihrer Grundfläche. Sie ist in der Richtung von vorn nach hinten (Fig. 25a) oval und konkav gewölbt und reitet mit dieser Höhlung auf der zu ihr quer gerichteten Gelenkfläche am oberen Rande der Ringknorpelplatte b.

Die Gelenkflächen am Ringknorpel springen konvex-zylindrisch hervor und haben einen kleineren geraden Durchmesser als die Gelenkfläche der Stellknorpel, während ihre Ausdehnung nach den Seiten größer ist als der Querdurchmesser der Stellknorpel. Die Folge davon ist, daß diese Gelenke sowohl eine Bewegung der Stellknorpel nach vorn und rückwärts als auch nach den Seiten hin und außerdem eine Drehung um ihre senkrechte Achse gestatten (Luschka, S. 94).

Die Gelenkflächen der Stellknorpel sind durch je ein Kapselband mit den zugehörigen Flächen des Ringknorpels verbunden. An der dem hinteren inneren Rand des Stellknorpels entsprechenden Stelle, welche durch den Zug der gespannten Stimmlippen sowie der an den Muskelfortsätzen sich ansetzenden Muskeln am meisten beansprucht wird, ist jedes Kapselband durch ein

festes fibröses Band (lig. crico-arytaenoid.) verstärkt (Fig. 26a). Außerdem aber erhalten die Stellknorpel noch durch das ligamentum jugale b eine stützende Verbindung miteinander und mit der Mitte des oberen Randes der Ringknorpelplatte. Diese Verbindung geschieht durch Vermittlung der beiden Santorinischen Knorpel c, welche auf den Spitzen der Stellknorpel elastisch befestigt und nach innen und rückwärts hornförmig abgebogen sind. Von ihren nach unten gerichteten Spitzen zieht je ein fadenförmiges Band mit dem anderen konvergierend nach unten, um sich bald zu einem platten Bandstreifen zu vereinigen, welcher sich an den oberen Rand der Ringknorpelplatte ansetzt.



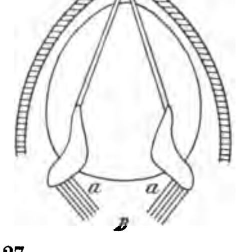


Fig. 26. Fig. 27.

In dieser Anordnung bilden die Kehlkopfknorpel das Gerüst des Kehlkopfes, zum Teil aber gleichzeitig die Hebelarme für die Bewegungen der Stimmlippen in ihre für die Atmung und die Stimmgebung erforderlichen Stellungen. Da der freie Durchgang der Atmungsluft durch den Kehlkopf Lebensbedingung ist, so sind die Stellknorpel mit den Stimmlippen in ihrer Ruhestellung mittelweit voneinander entfernt, so daß die zwischen ihnen liegende Öffnung, „die Stimmritze“ (Glottis), für die gewöhnliche ruhige und oberflächliche Atmung genügt. Diese Stellung entspricht etwa derjenigen, welche die Stimmlippen in der Leiche zeigen (Kadaverstellung), wo jeder Muskelzug ausgeschaltet ist und die Stellknorpel lediglich durch ihre elastischen Bänder in ihrer Normalstellung fixiert werden (Fig. 27 A). Sobald das Atembedürfnis größer ist, muß die Stimmritze über ihre Mittelstellung hinaus erweitert werden. Das geschieht durch die beiden hinteren Ring-Stellknorpel-Muskel (musc. crico-arytaen. postici), welche neben der Mitte der hinteren Fläche der Ringknorpelplatte ent-

springen und sich am Muskelfortsatz des Stellknorpels ansetzen. Bei ihrer Zusammenziehung wird der Muskelfortsatz nach hinten innen gezogen und dem entsprechend der Stimmfortsatz mit der Stimmlippe nach außen bewegt, weil die Basis des Stellknorpels als Winkelhebel wirkt, der in dem Ring-Stellknorpelgelenk seinen Stützpunkt hat (Fig. 27B a). Wirkt auf diesen Hebel eine Kraft in entgegengesetzter Richtung, also nach vorn, so müssen begreiflicherweise die Stimmfortsätze einander genähert werden. Diese Annäherung der Stimmfortsätze bewirkt jederseits der seitliche Ring-Stellknorpel-Muskel (m. circo-aryt. lateralis, Fig. 28 A¹), dessen Ansatzpunkte sich vorn an dem Muskelfortsatz des Stellknorpels einerseits und an dem oberen Rande des Bogens des Ringknorpels andererseits befinden. Wenn durch die

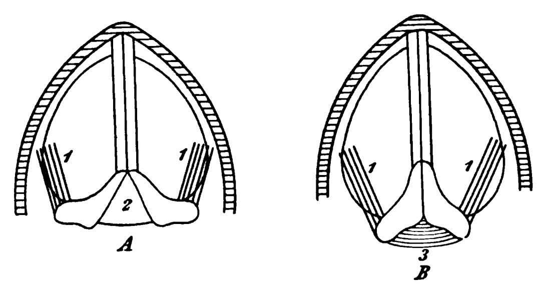


Fig. 28.

Zusammenziehung dieser Muskeln die Stimmfortsätze der Stellknorpel und mit diesen die Stimmlippen für eine Stimmgebung genügend genähert werden, so bleibt doch in dieser Stellung zwischen den inneren Flächen der Stellknorpel noch eine relativ große dreieckige Öffnung frei (Fig. 28 A²). Bei dem Versuch, in dieser Stellung Stimme zu geben, streicht die Ausatmungsluft lediglich durch diese dreieckige Öffnung und erzeugt jenes Geräusch, das wir mit „Flüsterstimme“ bezeichnen, während die Stimmlippen selbst unbeeinflußt und unbeweglich bleiben. Sollen die letzteren in Schwingungen versetzt werden, so muß der Strom der Ausatmungsluft lediglich durch den Spalt zwischen den Stimmlippen, die „Stimmritze“, dirigiert werden. Das kann aber nur geschehen, wenn die genannte dreieckige Öffnung durch Annäherung der inneren Flächen der Stellknorpel geschlossen wird. Diese Bewegung bewirkt der einfache „quere Stellknorpelmuskel“

(musc. arytaenoideus transversus), welcher von dem hinteren äußeren Rand des einen Stellknorpels entspringt, quer über die hintere konkave Fläche beider Stellknorpel hinzieht und sich am äußeren Rand des anderen festsetzt (Fig. 28 B³). Die Tätigkeit

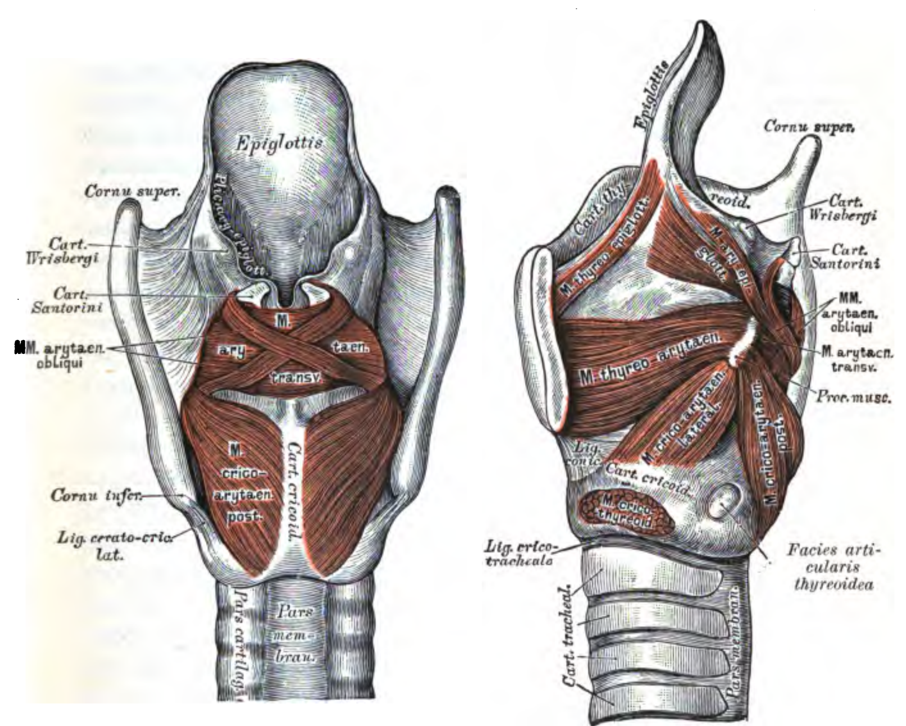


Fig. 29. Kehlkopf von hinten gesehen, nach Entfernung der Schleimhaut. (Nach Heitzmann.)

Fig. 30. Kehlkopf nach Entfernung der linken Schildknorpelplatte. (Seitenansicht. Nach Heitzmann.)

dieses Muskels wird unterstützt durch die beiden Stellknorpel-Kehldeckel-Muskeln (musc. ary-epiglottici s. arytaen. obliqui), die jederseits am hinteren Umfange des Muskelfortsatzes entspringen, sich kreuzend zur Spitze des anderen Stellknorpels heraufziehen und, um diese herum steil ansteigend, sich an dem seitlichen Rande des Kehldeckels ansetzen (Fig. 29). Ihre wesentliche Funktion besteht jedoch darin, den Kehldeckel herab-

zuziehen und den Kehlkopf-Eingang zu verkleinern. — Die entgegengesetzte Bewegung, die Hebung des Kehldeckels mit Erweiterung des Kehlkopf-Eingangs, wird durch die beiden von der Innenfläche des Schildknorpels nach rückwärts und oben zum Kehldeckel hinziehenden Schildknorpel-Kehldeckel-Muskeln (musc. thyreo-epiglottici) bewirkt (Fig. 30).

Sind nun die Stimmlippen mit Hilfe der entsprechenden Stellknorpel-Muskeln in die Stimmstellung gebracht, so bedürfen sie zur Tongebung außer der gegenseitigen Annäherung noch einer gewissen Spannung, um sich dem Druck der Ausatmungsluft mit einer angemessenen Elastizität entgegenstellen zu können. Diese Spannung vollzieht sich durch zwei außerordentlich zweckmäßige Einrichtungen. Die eine besteht in einfacher Dehnung der Stimmlippen mit Hilfe einer sehr sinnreichen Hebelvorrichtung.

Wir haben bereits erwähnt, daß der Schildknorpel an seinen unteren Hörnern mit je einem Hügelchen b an den seitlichen Rändern der Ringknorpelplatte durch je ein Gelenk verbunden ist. Es kann sich demnach sowohl der Schildknorpel wie der Ringknorpel um eine Achse a bewegen, welche die Verbindungslinie dieser beiden Gelenke darstellt (Fig. 31 a). Diese Bewegung vollziehen die beiden Ring-Schildknorpel-Muskeln (Musc. crico-thyroidei Fig. 23 und 31 c d). Dieselben entspringen jederseits von der äußeren Fläche des Bogens des Ringknorpels dicht neben der Mittellinie, ziehen divergierend nach oben außen und setzen sich am unteren Rande des Schildknorpels bis zum unteren Horne des letzteren an. Die Fasern des mittleren Teiles dieser Muskeln c verlaufen fast senkrecht (pars recta), die des äußeren Teiles d sehr schräg (pars obliqua), fast horizontal. Dementsprechend werden durch die Zusammenziehung des geraden Teiles die beiden Knorpel vorn einander genähert. Im allgemeinen nimmt man an, daß der Ringknorpel dabei feststeht, und somit der Schildknorpel

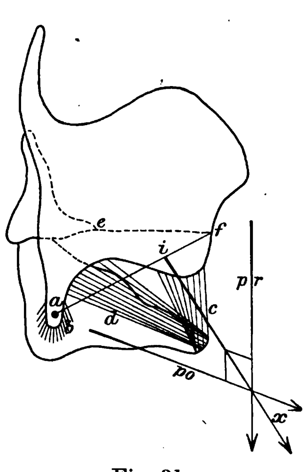


Fig. 31.

in der Richtung des Pfeiles heruntergezogen wird. Die seitlichen schrägen Partien der Ring-Schildknorpel-Muskeln d ziehen gleichzeitig den Schildknorpel nach vorn, was ja in einer gewissen Breite durchaus möglich ist, da die Kapseln der Ring-Schildknorpel-Gelenke ziemlich schlaff sind (Luschka).

Wenn wir zu den in Fig. 31 durch die Pfeile p r und p o bezeichneten Zugrichtungen der Pars recta (p r) und obliqua (p o) des Ring-Schildknorpel-Muskels die resultierende Kraftlinie x konstruieren, so ergibt sich, daß der Schildknorpel um die Achse a nach unten und vorn gezogen wird. Mit dieser Bewegung erfolgt aber eine Verlängerung bzw. Spannung der Stimmlippen. Ihr hinterer Ansatzpunkt (e) an dem Stimmfortsatz des Stellknorpels steht mit dem unbeweglichen Ringknorpel fest, der vordere Ansatz dagegen (f), im Winkel der beiden Schildknorpelplatten, muß begreiflicherweise die Bewegung des Schildknorpels mitmachen, und zwar ebenfalls um den Dreh- bzw. Achsenpunkt a. Verbindet man diesen letzteren Punkt durch eine gerade Linie mit f und zieht mit a f als Radius einen Kreis um a, so zeigt die Peripherie dieses Kreises den Weg an, auf dem sich der vordere Ansatzpunkt f der Stimmlippen mit dem Schildknorpel bewegen muß. Wird der letztere nun in der Richtung nach vorn unten gezogen, so geht der Punkt f auf der Kreislinie mit bis etwa zu g. Während aber dabei seine Entfernung von dem Achsenpunkt a gleichgeblieben ist, denn a f und a g sind als Radien gleich, hat sich die Entfernung des Punktes f von e vergrößert; denn g e ist die längste Seite des Dreiecks e f g, weil sie dem größten Winkel gegenüberliegt. Trägt man die Länge e f auf e g ab, so ergibt h g die Größe der Verlängerung der Linie e f bzw. der Dehnung und Spannung der Stimmlippen. Diese mechanische Wirkung des Schildknorpels gleicht der eines einarmigen Hebels a f, der auf a gestützt mit seinem Ende f einen Zug auf die horizontal ausgespannten Stimmlippen f e ausüben soll. Der Angriffspunkt für diese Kraftleistung liegt auf dem Hebel dort, wo derselbe von der

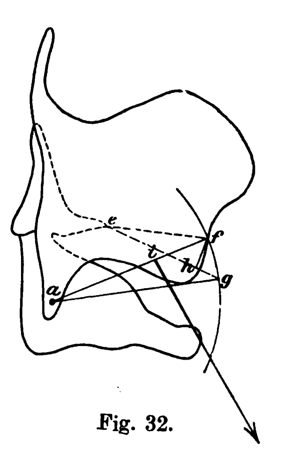


Fig. 32.

aus p r und p o resultierenden Kraftlinie x geschnitten wird (Fig. 31 und 32i). Diese aus den Faserrichtungen derRing-Schildknorpel-Muskeln hervorgehende Resultante trifft, wie die Zeichnung ergibt, den Hebelarm in seinem oberen Dritteil annähernd unter einem rechten Winkel und beweist damit, wie zweckmäßig die Fasern der genannten Muskeln für eine genügende Kraftleistung bei ihrer Aufgabe, den Schildknorpel nach vorn und unten zu ziehen, angeordnet sind. So schön und plausibel diese früher allein anerkannte Theorie von der Wirkung der musc. crico-thyreoidei durchgeführt ist, so hat sie doch ihre Gegner [1]), welche nicht den Ringknorpel, sondern den Schildknorpel als feststehend betrachten. Demnach würde umgekehrt der Ringknorpel durch den Zug der musc. crico-thyreoid. in der Richtung nach oben und rückwärts an den Schildknorpel herangezogen werden. Der Effekt der Stimmlippenspannung ist dabei derselbe wie bei der anderen Theorie. Die Hebelwirkung wird in demselben Maße von dem Ringknorpel geleistet, der sich als fast rechtwinkliger Hebel um dieselbe Achse a der Fig. 31 und 32 dreht und dementsprechend die Stellknorpel mit den hinteren Ansätzen der Stimmlippen von dem Schildknorpel entfernt. Zweifellos sind beide Theorien berechtigt, aber wahrscheinlicher ist die letztere, zumal der Schildknorpel durch eine starke äußere Muskulatur — die musc. hyo-thyreoidei und sterno-thyreoidei — fixiert erscheint, während der Ringknorpel in der Bewegung nach oben nicht behindert ist.

Achtes Kapitel.

Die innere Spannung der Stimmlippen durch die Stimm-Muskeln (Musc. thyr. arytaen.) — Anatomie dieser Muskeln — Chorda vocalis — Verlauf der Muskelfasern nach Ludwig, Rühlmann, Grützner, Jacobson Henle — Membrana elastica laryngis und die Kehlkopf-Schleimhaut — Gestaltung des unteren, mittleren und oberen Kehlkopfraumes.

Die einfache Dehnung der Stimmlippen ist aber allein nicht imstande, die Spannung derselben in so feiner Abstimmung zu verändern, wie es die Tonleiter durch zwei Oktaven und darüber erfordert. Bei der Kürze der Stimmlippen und der geringen Ver-

---

[1]) Vgl. E. Barth, Über die Wirkungsweise der musc. crico-thyreoid. und ihre Beziehungen zur Tonbildung. Archiv für Laryngol. Bd. XIII, 1902, S. 187 ff.

änderlichkeit ihrer Länge ist es notwendig, daß ihre Elastizität auch durch innere Spannung und den Wechsel ihrer Dicke verändert werden kann. Diesem Zweck dient der jeder Stimmlippe eingelagerte innere Schild-Stellknorpel-Muskel (musculus thyreoarytaenoideus internus) oder „Stimm-Muskel". Er entspringt jederseits vorn von dem bereits erwähnten faserknorpelartigen Wulste im Winkel des Schildknorpels dicht unter dem Ansatz des Kehldeckelstieles und setzt sich rückwärtsziehend an der Spitze und dem unteren Rande des Stimmfortsatzes sowie an der Außenseite des Stellknorpels fest (Fig. 24 und 34). Er ist dreiseitig prismatisch

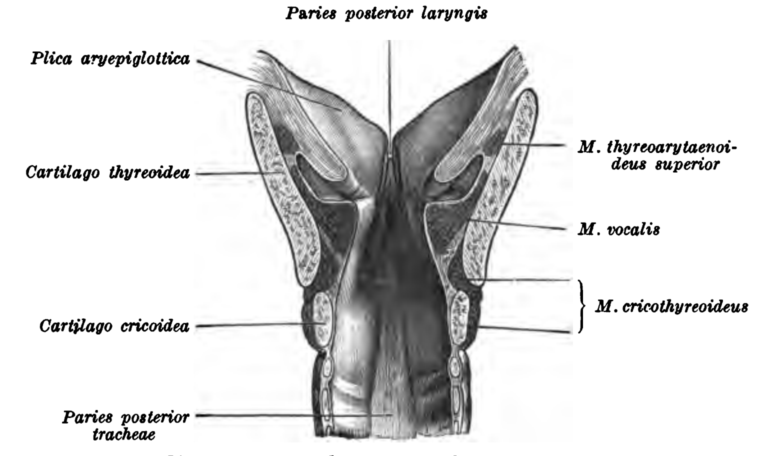


Fig. 33. Frontalschnitt durch den Kehlkopf, hintere Hälfte. (Nach Heitzmann.)

geformt, so daß seine Querschnitte im Schema annähernd rechteckige Dreiecke darstellen, deren längere Kathete der angewachsenen Außenseite, die kurze der Oberfläche, und die Hypotenuse der schrägen unteren Fläche des Muskels entspricht (Fig. 33 und 37). Der von der kurzen Kathete und der Hypotenuse eingeschlossene Winkel ist dem Kehlkopf-Innern zugekehrt und bildet den freien Rand des Muskels. Die untere und obere Fläche der beiden einander zugekehrten Muskeln ist von der gleich näher zu beschreibenden elastischen Kehlkopfhaut überzogen, die an den freien Rändern eine Verdickung erfährt. Diese elastischen am Muskelrande bandartig verlaufenden Bindegewebsfasern wurden

ligamentum thyreo-arytaen. infer. — unteres Schild-Stellknorpelband — oder Chorda vocalis — Stimmsaite genannt. C. Ludwig [1]) hat diese „Chorda vocalis" als Sehne eines Teiles des „Stimm-Muskels" angesprochen, zumal er in demselben Muskelfasern fand, die schief in der elastischen Randsubstanz endeten. Ebenso konnte A. Rühlmann[2]) an mikroskopischen Schnitten feststellen, daß Muskel-Insertionen am Rande der Stimmlippe ganz bestimmt existieren. Desgleichen sah Henle [1]) die dem Rande näher liegenden Muskelbündel zwischen die elastischen Züge des lig. thyr.-arytaen. infer. (Chorda vocalis) eindringen und sich mit denselben verbinden. Einige Muskelbündel hören hier auf, andere nehmen an diesem elastischen Randgewebe der Stimmlippen ihren Anfang. Auch Grützner (S. 54) gibt an, daß im Stimm-Muskel ein System schräger Fasern vorhanden ist, welche vom Stimmfortsatz von hinten unten und außen nach vorn oben und innen, die hinteren am steilsten, die vorderen weniger steil, aufsteigen und sowohl in der freien Stimmlippenkante (der elastischen Chorda vocalis) wie an der medialen Fläche der Stimmlippe und im Muskel selbst enden. Überhaupt zeichne sich der Stimm-Muskel vor den übrigen Muskeln des menschlichen Körpers dadurch aus, daß in seinem Inneren eine große Zahl von Muskelfasern entspringt und auch wieder endet, „wodurch er einerseits zu vielfachen Gestaltsveränderungen befähigt wird und andererseits, indem die Fasern in den verschiedensten Richtungen des Raumes orientiert sind, in die Länge, Quere und Dicke gespannt werden" kann. Ebenso fand A. Jacobson [3]) bei seinen mikroskopischen Untersuchungen über den Bau des Stimm-Muskels, daß in horizontalen Längsschnitten der Stimmlippen nicht selten die am Stimmfortsatz und an der Außenfläche des Stellknorpels beginnenden Muskelbündel nach innen zum freien Rande umbiegen und in dem elastischen Gewebe desselben schräg enden, wie schrägstehende Zähne eines Kammes. Auf Querschnitten sah er Muskelbündel, welche unter fast rechtem Winkel zum „Stimmlippenrande" hinziehen. Im allgemeinen fand er den unteren Abschnitt der Stimmlippen am reichsten an schrägen und queren Bündeln,

[1]) C. Ludwig, Lehrbuch der Physiol., 1858, S. 570.

[2]) Jacobson, Zur Lehre vom Bau u. d. Funktion der musc. thyr.-aryt. inf. Archiv f. mikroskop. Anat. 1887, Bd. 29.

[3]) Jacobson, l. c.

welche am Rande inserieren. Diese schief verlaufenden Muskelbündel waren unter 20 Kehlköpfen nur dreimal nicht vorhanden. Jacobson schließt daraus, daß in den letzteren Fällen die Stimmlippen weniger Töne hervorzubringen imstande waren, weil er annehmen zu müssen glaubte, daß den schiefen und queren Muskelbündeln ein Einfluß auf die von den Stimmlippen erzeugten Tonhöhen zuzuschreiben sei. Die Wirkungsweise dieser Muskelfasern bei ihren gesonderten Zusammenziehungen vergleicht er mit dem „Andrücken und Verrücken" der Finger auf der Violinsaite beim Geigenspielen. Wie dort durch die Finger werde hier durch die Tätigkeit dieser Muskeln eine Verkürzung der schwingenden Teile der bereits gespannten Stimmlippe bewirkt und damit auch verschiedene Tonhöhen erzielt. Eine andere, aber doch ähnliche Erklärung hatte bereits Ludwig (l. c.) gegeben. Er glaubte nämlich, daß durch die von ihm gefundenen schräg verlaufenden Muskelbündel, sofern sie gesondert tätig sind, die Stimmlippen in ihrem zwischen dem Stimmfortsatz und den Ansatzpunkten dieser Muskeln gelegenen Teilen abgespannt werden, während der übrige Teil gespannt bleibt. Auch Henle ist der Ansicht, daß die in dem elastischen Gewebe des Stimmlippenrandes sich ansetzenden Bündel des Stimm-Muskels nicht ohne Einfluß auf die Eigenschaften der Stimmlippenschwingungen sind. Stoerk schließt sich als Praktiker dieser Annahme an, zumal ihm die Schwingungsform der Stimmlippen bei der Bildung der Falsettöne durch die schiefen Muskelfasern bedingt zu sein scheint.

Wenn nun auch die genannten mikroskopischen Untersuchungen über den Verlauf der Muskelbündel im Stimm-Muskel vereinzelt geblieben sind, so zwingt uns doch die Übereinstimmung der von den genannten Autoren gefundenen Resultate, den schiefen Muskelbündeln eine wesentliche Bedeutung für die feineren Leistungen der Stimmlippen beizulegen. Wir werden dieselben bei Besprechung der Stimmlippenschwingungen noch erwähnen.

Nach allgemeiner und unbestrittener Annahme besteht die Funktion der beiden Stimm-Muskeln wesentlich darin, durch ihre Zusammenziehungen entweder allein — bei den tiefen Tönen — oder unter gleichzeitiger Dehnung durch den Spannmuskel (musc. cricothyr.) — bei den höheren Tönen — den Stimmlippen den für die verschiedenen Tonhöhen nötigen Spannungsgrad zu geben. Es ist begreiflich, daß durch die verschiedenen Grade der Zusammen-

ziehung auch eine entsprechende Verdickung dieser Muskeln sich geltend macht, welche ihre freien Ränder bis zur gegenseitigen Berührung einander nähern kann. Unterstützt wird diese letztere durch zwei weitere flache Muskeln, welche auf der Außenseite den Stimm-Muskeln dicht anliegen, neben den letzteren am Schildknorpel enstpringen und am Muskelfortsatz des Stellknorpels sich ansetzen. Ihr Ansatz an dieser Stelle befähigt sie, wie Fig. 34 M zeigt, durch ihre Zusammenziehung sowohl einen Seitendruck auf den Stimm-Muskel auszuüben, als auch den Muskelfortsatz nach vorn zu ziehen und damit die Stimmfortsätze aneinander zu drücken. Dieser „äußere Schild - Stellknorpel - Muskel“ (musculus thyreo-arytaenoideus externus) ist jederseits mit dem inneren, dem eigentlichen Stimm-Muskel, so eng verbunden, daß er nach der Beschreibung von Merkel nicht als gesonderter Muskel, sondern nur als „äußere Portion“ desselben angesehen werden kann. E. Meyer[1]) schließt sich auf Grund seiner neueren eingehenden Untersuchungen dieser Auffassung an. Endlich ist noch eine „obere Portion“ dieses Muskelkomplexes als „oberer Schild-Stellknorpel-Muskel“ (musc. thyr.-aryt. superior) zu erwähnen, der am Schildknorpel in der Nähe des oberen Randes und seines Einschnittes entspringt, mit nach oben konvexem Bogen als runder Muskelstrang rückwärts herabzieht und sich an der Basis des Muskelfortsatzes, zuweilen auch gleichzeitig am Seitenrande des Stellknorpels ansetzt. Eine funktionell besondere Bedeutung kann jedoch diesem Muskel nicht beigelegt werden, weil er nicht regelmäßig vorkommt, sondern nur in einem Viertel der Kehlköpfe gefunden wird (Luschka).

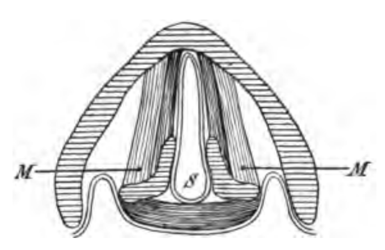


Fig. 34.

Das Knorpelgerüst des Kehlkopfes mit den eben genannten Muskeln ist von einer Schleimhaut überzogen, welche aus der Rachenhöhle kommend sich in das Innere des Kehlkopfes fortsetzt. In der Kehlkopfhöhle dient ihr größtenteils eine elastische

[1]) E. Meyer, Zur Kenntnis der inneren Kehlkopfmuskeln. Arch. f. Laryngol. Bd. VI, 1897, S. 430.

Bindegewebsfaserhaut — membrana elastica laryngis —, Fig. 35 Me, als Grundlage, welche sich als Fortsetzung der elastischen Luftröhrenhaut vom oberen Rande des Ringknorpel-Bogens nach hinten zur Basis der Stimmfortsätze und zu den inneren, medialen Rändern der Stellknorpel erstreckt, nach vorn zum Winkel des Schildknorpels und hinauf zu den Seiten des Kehldeckels K, so daß ihre oberen Ränder in leichtem Bogen schräg zu den Spitzen der Stellknorpel abfallen [1]). Bei ihrer Auskleidung der inneren Kehlkopfräume zeigt sie verschiedene Dicke. Am stärksten ist sie im unteren Kehlkopfraume, wo sie von den Seiten her, leicht gewölbt die innere untere Fläche des Stimm-Muskels faszienartig bedeckend, medianwärts zum freien Rande dieses Muskels zieht, um hier nach außen auf die obere Fläche des letzteren umzubiegen, und somit eine Falte — „die Stimmfalte“ — zu bilden, welche von dem Stimm-Muskel ausgefüllt wird (Me′). An der Umschlagstelle, also dem freien Rande des eingelagerten Stimm-Muskels entsprechend, ist die elastische Kehlkopfhaut durch Verdichtung der elastischen Fasern bandartig verdickt und mit den angrenzenden Muskelfasern als „chorda vocalis“ fest verwachsen, während ihre Verbindung mit den übrigen Teilen des Stimm-Muskels nur locker ist. Dieser randständige elastische Faserzug ist vorn, dicht neben dem der anderen Seite, mit dem zugehörigen Stimm-Muskel an der Ursprungsstelle des letzteren angeheftet und schließt kurz vor seinem Ansatz jederseits ein Netzknorpelknötchen ein; hinten geht er in die faserige Grundsubstanz der knorpeligen Spitze des Stimmfortsatzes über, während andere Faserzüge an der Innenfläche des Stimmfortsatzes sowie über dem letzteren am vorderen Rande des Stellknorpels befestigt sind. Der bandartige Charakter dieser

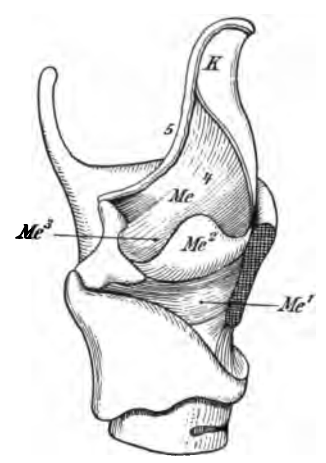


Fig. 35. (Nach Luschka.)

[1]) Luschka, Der Kehlkopf des Menschen, S. 89.

verdichteten Randpartie der elastischen Membran hat Morgagni bewogen, sie als ein ligamentum thyreoideum inferius — unteres Schild-Stellknorpelband — anzusprechen. Ferrein nannte den Rand der beiden gegenüberliegenden Falten „cordes vocales", chordae vocales — Stimmsaiten, weil er glaubte, daß hier elastische Bänder vorlägen, welche den Saiten einer Geige glichen und durch die vorbeistreichende Luft zum Tönen erregt würden wie die Geigensaiten durch den Violinbogen. Wie irrig diese Annahme war, wird sich weiter unten bei dei Erörterung der Mechanik der Stimmlippen ergeben. —

Oberhalb des Stimm-Muskels ist die elastische Kehlkopfhaut erheblich dünner und buchtet sich nach außen und oben aus, um den Morgagnischen Ventrikel (Fig. 35 Me²), die „Kehlkopftasche", zu bilden. Durch diese Ausstülpung entsteht eine mit der den Stimm-Muskel überziehenden „Stimmfalte" gleichgerichtete und ebenfalls in das Kehlkopfinnere vorspringende Leiste, in der jedoch der häutige Charakter der elastischen Membran schwindet. Durch Einlagerung von zahlreichen Schleimdrüsen zwischen die elastischen Fasern wird nämlich ihr Gewebe in zahlreiche abwechselnd zusammenfließende Faserzüge zerklüftet, welche sich nur an den Ansatzpunkten der Leiste strangartig vereinigen, und zwar vorn im Winkel des Schildknorpels dicht neben dem lig. thyreoepiglotticum (Fig. 22), hinten an der vorderen Fläche des Stellknorpels (fovea triangularis). Gleichwohl hat man diese Leisten die „oberen Schild-Stellknorpelbänder" (ligament. thyreoarytaenoid. superiora) und dann kürzer „Taschenbänder" genannt (Fig. 35 Me³). Den letzteren Namen führen sie auch nach der Korrektur der anatomischen Bennennungen heute allgemein, obwohl sie, wie Luschka bereits mit Recht sagt, im Gegensatz zu den „Stimmleisten", cristae vocales — „Drüsenleisten", cristae glandulares heißen müßten.

Oberhalb des Taschenbandes setzt sich die membrana elastica, wie bereits erwähnt, an den Rändern des Kehldeckels fest und ist dem Verlauf derselben entsprechend leicht ausgebogen (Fig. 35 Me⁴). In diesem oberen Teil erreicht sie ihr Ende mit einem schräg von vorn oben nach hinten verlaufenden Rande und bildet als sogenannte membrana quadrangularis die Grundlage zu den ary-epiglottischen Schleimhautfalten (Fig. 35⁵). Die letzteren entstehen dadurch, daß die Schleimhaut des Rachens welche den

ganzen Kehlkopf überzieht, am oberen schrägen Rande der elastischen Kehlkopfhaut umbiegt und sich auf ihre innere Seite in den Kehlkopf hinein fortsetzt. Zwischen diese beiden Schleimhautblätter ist in der Nähe der Stellknorpel jederseits ein stab- oder keilförmiger Knorpel senkrecht eingelagert, anscheinend um die ary-epiglottischen Falten an dieser Stelle zu stützen. Die Lage dieser sogenannten „Wrisberg'schen" oder keilförmigen Knorpel (cartilago cuneiformis) ist jederseits durch ein nahe dem Santorinischen Knorpel sichtbares Hügelchen gekennzeichnet (Fig. 29).

Die Schleimhaut des Kehlkopf-Innern ist mit Ausnahme der vorderen Wand, wo sie dem Kehldeckel straff und unverschieblich aufliegt, nur locker mit ihrer Unterlage verbunden, und zwar um so loser, je mehr ihre Unterlage durch die Bewegungsvorgänge beim Atmen und bei der Stimmgebung gedehnt oder verkürzt wird. Dies trifft vor allem an der zwischen den Stellknorpeln gelegenen hinteren Wand der Kehlkopfhöhle und ganz besonders bei den Stimmlippen zu. Die hintere Wand des Kehlkopfes wird unterhalb der Stimmlippen von der Platte des Ringknorpels gebildet und ist demnach starr. Über den Stimmlippen aber schließt der quere Stellknorpel-Muskel — musc. transversus —, der, wie erwähnt, zwischen den beiden hinteren Flächen der Stellknorpel ausgespannt ist, die Kehlkopfhöhle nach hinten ab. Die Größe der hinteren Wand wechselt deshalb hier mit der Bewegung der Stellknorpel und erreicht ihr Maximum bei tiefer Einatmung und ihr Minimum, wenn die Stellknorpel zur Einstellung der Stimmlippen für die Stimme aneinanderrücken. (Fig. 34 S). Diese Variation der Ausdehnung der hinteren Wand ist dadurch ermöglicht, daß die Schleimhaut hier — ohne Vermittlung der elastischen Kehlkopfhaut — in Längsfalten direkt dem musc. transversus aufliegt und mit diesem durch lockeres Zellgewebe verbunden ist, so daß sie sich wie die Wand einer Ziehharmonika leicht entfalten und wieder falten kann. — Die Stimmleisten oder „Stimmlippen" vollends, deren Elastizität durch die tonerzeugenden Schwingungen außerordentlich beansprucht wird, haben den dünnsten Schleimhautüberzug. Derselbe ist auf seiner Unterlage, der Stimmfalte der elastischen Kehlkopfhaut, durch eine dünne Zellstoffschichte so locker angeheftet, daß sich die Schleimhaut leicht verschieben und in Fältchen erheben läßt. Diese Einrichtung ist für die Schwin-

gungsfähigkeit der Stimmlippen von großer Wichtigkeit, da bereits geringe Verdickungen oder Schwellungen der Schleimhaut, wie sie sich z. B. bei Katarrhen zeigen, die Stimme durch Heiserkeit wesentlich zu beeinträchtigen imstande sind.

In dieser Anordnung seiner einzelnen Bestandteile, die wir nur insoweit erwähnt haben, als dies für das Verständnis seiner mechanischen Leistung erforderlich erschien, stellt der Kehlkopf im ganzen ein zylindrisch röhrenförmiges Gebilde dar, dessen unteres Ende mit der Luftröhre verbunden ist, während das obere in die Rachenhöhle hineinragt (Fig. 17 und 36). Dieser obere freie Rand ist von vorn oben, dem oberen Rand des Kehldeckels, nach hinten unten zu den Spitzen der Stellknorpel und der hinteren Wand abgeschrägt, so daß die Höhe des Kehlkopfes nach den Angaben von Luschka vorn etwa 7,8 hinten 4,3 cm beträgt. Im Innern dieser Röhre springen in ihrem geraden — sagittalen — Durchmesser etwa 2,8 cm über dem unteren Ende des Kehlkopfes die Stimmlippen (Fig. 36 S) und etwa 3 mm höher die Taschenbänder T leistenartig vor. Die Kehlkopfhöhle wird durch diese Vorsprünge in einen oberen (a), mittleren (b) und unteren (c) Raum geteilt. Der obere Kehlkopfraum oder Vorhof (vestibulum) ist auf dem Durchschnitt trichterförmig, der mittlere, zwischen den Taschenbändern und Stimmlippen gelegene ist breit und niedrig — etwa 3 mm — und enthält die spaltförmigen Mündungen (rimae ventriculi) zu den Morgagnischen Taschen, der untere befindet sich unterhalb der Stimmlippen und zeigt einen gegen die Medianebene geneigten und etwas gewölbten Verlauf seiner Seitenwände.

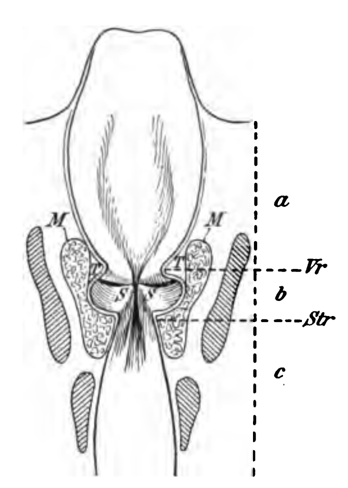


Fig. 36. (Nach Luschka.)

Die vorderen Ansätze der beiden Leistenpaare befinden sich, wie bereits erwähnt, vorn übereinander im Winkel des Schildknorpels, während hinten die Stimmlippen am Stimmfortsatz und die Taschenbänder oberhalb desselben in

einem Grübchen (fovea triangularis) an der vorderen, auswärts gerichteten Fläche der Stellknorpel befestigt sind. Die gemeinsamen Ansätze an den beweglichen Stellknorpeln bringen es mit sich, daß die Taschenbänder sowohl die Atembewegungen der Stimmlippen als auch deren Bewegungen in die Stimmstellung gleichzeitig mitmachen. Dabei bewirkt die mehr seitliche Anheftung der Taschenbänder an den Stellknorpeln, daß sie weniger weit gegen die Mittellinie der Kehlkopfhöhle vorspringen, als die an den mehr einwärts gelegenen Stimmfortsätzen befestigten Stimmlippen. Deshalb bleibt auch während der größten gegenseitigen Annäherung der Stimmlippen — in der Stimmstellung — zwischen den leicht geschweiften Rändern der Taschenbänder ein elliptischer Spalt (Fig. 36 Vr), die Vorhofsritze — rima vestibuli, frei, der etwa 5—6 mm breit ist und beim Einblick von oben die Oberfläche der Stimmlippen frei übersehen läßt (vgl. d. photogr. Taf. I—VI). Die Breite der Vorhofsritze — früher „falsche Stimmritze" genannt — ist durch die Aktion der äußeren und oberen Bündel des muscul. thyreo-arytaenoideus variabel. Durch kräftige Zusammenziehung dieser Muskelbündel, welche, wie aus der Fig. 36 M zu ersehen ist, die Taschenbänder ziemlich hoch umgreifen, können die letzteren bis fast zur gegenseitigen Berührung einander genähert werden. Diese letztere Bewegung der Taschenbänder findet immer beim Schluckakt statt, um unter gleichzeitiger Mitwirkung des musc. ary-epiglotticus (Fig. 30), der den Kehldeckel nach hinten herunterzieht und den Kehlkopfeingang verengt, das Eindringen von Speisen in den Kehlkopf zu verhindern. Zuweilen aber, wenn die Stimmlippen durch Erkrankung funktionsunfähig geworden sind, treten die Taschenbänder mit dieser Beweglichkeit auch für die Erzeugung der Stimme als Notbehelf ein. Da hierbei die Schwingungen der wulstigen Taschenbänder sehr schwerfällig sind, kann die mit ihrer Hilfe erzeugte Stimme selbstverständlich nur tief und schnarrend sein.

Neuntes Kapitel.

Atmungsstellung der Stimmlippen — Stimmritze, ihre Länge und Weite — Stimmeinsatz — Sprech- und Singstimme — Tonumfang der männlichen und weiblichen Stimme — Erklärung des Unterschiedes der Stimme bei den Geschlechtern durch die Länge der Stimmlippen und Entwicklung der Stimm-Muskeln — Untersuchungen von Ferrein und J. Müller über die äußere Spannung der Stimmlippen am toten Kehlkopf — Versuche über die innere Spannung von Froschmuskeln bei elektrischer Reizung von Harless, Ewald und Nagel.

Während der ruhigen Atmung befinden sich die Stellknorpel und Stimmlippen, wie bereits bei der Besprechung der Kehlkopfmuskeln erwähnt ist, in einer Stellung, in der sich die Kräfte der Muskeln, welche die Stellknorpel nach außen und nach innen bewegen, im Gleichgewicht halten. Die Folge davon ist, daß die Stimmlippen und in ihrer Verlängerung die Stellknorpel in einer dem durchschnittlichen Atembedürfnis entsprechenden mittleren Weite voneinander entfernt bleiben und einen Spalt „die Stimmritze", rima glottidis, seit Morgagni (1781)[1]) kurzweg Glottis genannt (Fig. 36 Str), in der Form eines gleichschenkligen Dreiecks bilden, dessen Spitze sich vorn am Schildknorpel und die Basis an der zwischen den Stellknorpeln gelegenen hinteren Wand des Kehlkopfes befindet (Fig. 34). Bei tiefer Atmung erweitert sich die Stimmritze erheblich. Die Stimmfortsätze divergieren, so daß die Stimmritze die Gestalt eines Fünfecks mit einem nach vorn gerichteten spitzen Winkel erhält. Der letztere ist auf Taf. I[1]) durch den Kehldeckel verdeckt. Die Seiten des Dreiecks, die von den Stimmlippen und den inneren Flächen der Stellknorpel gebildet werden, sind bei Männern nach Rauber-Kopsch (Bd. IV, S. 211) durchschnittlich etwa 2—2,4 cm lang, während seine Basis bei ruhiger Atmung etwa 0,5 cm breit ist, sich aber bei tiefer Atmung bis zu 1,4 cm vergrößern kann. Beim Weibe und beim Knaben betragen die Maße etwa $^1/_5$ weniger. Da die Seiten der „Stimmritze" aus den Stimmlippen und den Stellknorpeln bestehen, so wurde an der ganzen Stimmritze der „elastische Teil" als rima glottidis musculosae von dem „knorpeligen Teil", rima glottidis cartilagineae unterschieden. Die elastische Stimmritze,

[1]) B. Fränkel, Studien zur feineren Anatomie des Kehlkopfes. Arch. f. Laryngol. u. Rhinol. Bd. I

welche der Länge der Stimmfalten entspricht, ist beim Manne etwa 1,5 beim Weibe 1,2 cm lang.

Bei der Stimmgebung schwindet dieser dreieckige Spalt dadurch, daß die Stimmlippen und die Stellknorpel sich bis zur gegenseitigen Berührung nähern. Die Art bzw. die Geschwindigkeit, mit der die Stellknorpel und die Stimmlippen aus der Atmungsstellung in die Stimmstellung übergehen, sowie der Grad der Festigkeit des Stimmlippenschlusses haben einen wesentlichen Einfluß auf die Stimme im Augenblick ihres Anfangs, der allgemein als „Stimmeinsatz" bezeichnet wird [1]). Stellen sich die Stellknorpel mit den Stimmlippen während der Ausatmung zur Stimmgebung ein, d. h. rücken sie gewissermaßen allmählich aus der Ausatmungsstellung in die hauchende und dann erst in die Stimmstellung, so ist der Stimmeinsatz „hauchend". Wird dagegen die Glottis vor der Stimmgebung fest geschlossen, so kommt mit einem hörbaren Explosionsgeräusch — coup de glotte — plötzlich der „feste Einsatz" zustande.

Außerdem unterscheidet man noch einen von Sievers [2]) so genannten „leisen Vokal-Einsatz", in dem die Stimmlippen die Stimmritze nicht fest schließen, sondern sich nur so weit nähern, als es zur Erzeugung eines leisen Tones genügt. Dieser „leise Stimmeinsatz" kommt besonders für den Gesang bei weich beginnenden Tönen in Betracht, während die beiden anderen Stimmeinsätze wesentlich der Aussprache dienen, und zwar der „hauchende" zur Ausprache des h, der „feste" zur Charakteristik der reinen Vokale und ihrer Kombinationen.

Dem „Stimmeinsatz" schließen sich unmittelbar die Schwingungen der Stimmlippen an, welche die Stimme erzeugen. Beim Sprechen bewegt sich die Stimme in einer bequemen Tonlage des Brustregisters, welche an die Spannung der Stimmlippen, bzw. an die Tätigkeit der an der Stimmbildung beteiligten Muskeln relativ geringe Anforderungen stellt. Nach Untersuchungen, welche Gutzmann [3]) an Erwachsenen vorgenommen hat, liegt die durchschnittliche Tonhöhe der männlichen Sprechstimme zwischen A und d, beim weiblichen Geschlecht und Kindern ungefähr eine

[1]) Grützner, S. 91. — Gutzmann, Physiol. d. Stimme u. Sprache, S. 46.
[2]) E. Sievers, Grundzüge der Lautphysiologie, S. 77. Leipzig 1876.
[3]) Dr. H. Gutzmann, Stimmbildung und Stimmpflege, Wiesbaden 1912, S. 127.

Oktave höher. Die Töne der Sprechstimme werden aber nicht in der angesetzten Höhe gehalten, sondern gehen ohne deutliches Intervall (Liskovius) selbst im Bereich einer Silbe schon nach sehr kurzer Zeit in die Höhe oder Tiefe. Die Stimmlippenschwingungen sind demgemäß beim Sprechen nicht in der Zeitfolge gleich, sondern wechseln außerordentlich schnell ihre Periode, d. h. ihre Schwingungszahl in der Zeiteinheit.

Beim Singen dagegen tritt die Stimme in den Dienst der Musik, hat demnach die Aufgabe, nicht nur eine größere Reihe durch musikalisch bestimmte Intervalle unterschiedener Töne zum Ausdruck zu bringen, sondern dieselben auch dem musikalischen Rhythmus entsprechend lange rein in der angesetzten Höhe zu erhalten, d. h. die Stimmlippen müssen hier mit gleichmäßiger Schwingungszahl und -form schwingen. Die einzelne Gesangstimme vermag dies durchschnittlich etwa in der Tonreihe von 2 Oktaven zu leisten, so daß sich die Schwingungszahlen des tiefsten und des höchsten von einem Kehlkopf erzeugten Tones etwa wie 1 : 4 verhalten. So reicht nach Stockhausen und Spiess (Fig. 37)

die Baß-Stimme von E (81,4) — e′ (325,8), ausnahmsweise[1]) D (72,5) — g′ (387,5),

die Bariton-Stimme von G (96,8) — g′ (387,5), ausnahmsweise Fis (91,4) — g′ (387,5),

Tenor von H (122,06) — h′ (488,2) ausnahmsweise A (108,7) bis d″ (580,6),

Kontra-Alt von d (145,1) — d″ (580,6), ausnahmsweise cis (137,0) — f″ (690,5),

Hoher Alt von g (193,7) — f″ (690,5), ausnahmsweise fis (182,8) — a″ (870, 0),

Mezzo-Sopran von a (217,5) — a″ (870,0), ausnahmsweise gis (205,2) — c‴ (1034,6),

Sopran von c′ (258,6) — c‴ (1034,6), ausnahmsweise h (244,1) — e‴ (1303,4).

---

[1]) Aus der Physiologie von J. Müller (S. 212) entnehme ich, daß die in der Tabelle angegebenen ausnahmsweise erreichten Höhen von einzelnen Sängern noch übertroffen wurden. Fischer, der Vater des später berühmt gewordenen Sängers erreichte in der Tiefe F, die jüngste unter den Schwestern Sessi umfaßte drei Oktaven und drei Töne c—f‴, die Zelter sang drei, die Catalani dreieinhalb Oktaven.

Demnach erstreckt sich der Umfang der menschlichen Stimme im allgemeinen auf die Töne von über 4 Oktaven, die große Oktave,

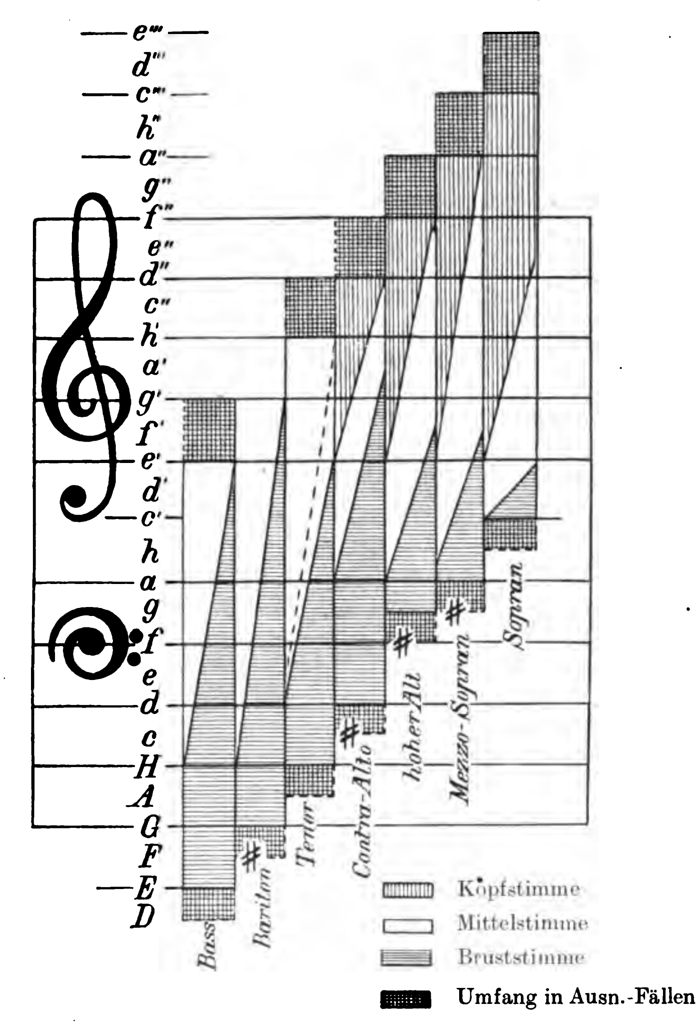


Fig. 37. Tabelle von Stockhausen-Spieß. (Nach Schmidt-Meyer.)

kleine Oktave, eingestrichene Oktave, zweigestrichene Oktave, so daß der tiefste Ton E (Baß) 81,47, der höchste c''' (Sopran) 1034,61

Schwingungen hat. Davon gehören in den Bereich der männlichen Stimme die Töne von E—h′, der weiblichen Stimme die Töne von d—c‴. Der tiefste Ton der männlichen Stimme (Baß) liegt im allgemeinen etwa 1 Oktave (E—d) unter dem tiefsten Ton der Frauenstimme (Kontra-Alt), während die Differenz ihrer höchsten Töne meist größer ist, h′—c‴.

Der genannte Unterschied der Stimmleistung des männlichen und des weiblichen Kehlkopfes in bezug auf die Tonhöhe ist zweifellos zunächst durch die Tatsache zu erklären, daß die tonerzeugenden schwingenden Teile, die Stimmlippen, beim erwachsenen männlichen Geschlecht länger sind, als beim weiblichen. Nach Rauber-Kopsch beträgt die Länge der Stimmlippen durchschnittlich beim Mann 1,5 cm, beim Weibe 1,2 cm. Es würde demnach das Verhältnis der Längen der Stimmlippen = 5 : 4 sein. Johannes Müller (S. 200) gibt diesen Unterschied sogar noch größer in dem Verhältnis 3 : 2 an. Diese relativ große Differenz der absoluten Länge der Stimmlippe muß beim Manne eine tiefere Stimmlage zur Folge haben, weil alle transversal schwingenden Körper dem allgemeinen physikalischen Gesetz unterworfen sind, daß bei sonst gleicher Dicke und Spannung bezugsweise Elastizität die längeren Körper in der Sekunde eine kleinere Schwingungszahl haben, als die kürzeren. Die Schwingungszahlen von Zungenpfeifen, deren metallene Zungen gleiche Dicke haben, verhalten sich z. B. umgekehrt wie die Quadrate ihrer Längen:

$$S : S_1 = L_1^2 : L^2.$$

Bei transversal schwingenden Saiten von gleicher Stärke und Spannung sind die Schwingungszahlen den einfachen Längen umgekehrt proportional:

$$S : S_1 = L_1 : L,$$

d. h. also längere Saiten und Stäbe schwingen langsamer als kurze.

Für die Schwingungszahlen der Stimmlippen lassen sich mathematische Formeln nicht aufstellen, weil die Stimmlippen nicht aus einem einwertigen elastischen Material, sondern aus mehreren unmeßbaren und verschieden elastischen Geweben bestehen, und zudem auch ihre eigenen Dimensionen aus anatomischen Gründen nicht einwandfrei feststellbar sind. Gleichwohl

haben sorgfältige Untersuchungen an toten und künstlichen Kehlköpfen über die Schwingungszahlen der Stimmlippen bei verschiedener Spannung zu Resultaten geführt, welche unter gebührender Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen lebenden und toten Geweben doch klärende Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der lebenden Stimmlippen gestatten. Zur richtigen Einschätzung solcher Untersuchungen führe ich jedoch an dieser Stelle die Worte Ewalds [1]) an, denen ich mich durchaus anschließe. „Man darf nicht vergessen, daß der abgestorbene Kehlkopf niemals den natürlichen Vorgang wiedergeben kann. Bei ihm können nämlich die Stimmbänder immer nur durch Verlängerung gespannt werden, während im lebenden Kehlkopf die Spannung der Stimmbänder infolge ihrer eigenen Kontraktion ohne Verlängerung ja sogar unter Verkürzung hervorgebracht werden kann. Daher bewirkt jede Spannung der Stimmbänder am ausgeschnittenen Kehlkopf nicht nur eine unrichitge Verlängerung derselben, sondern, was besonders ungünstig ist, auch eine ganz unnatürliche Verschiebung aller übrigen Teile. Im allgemeinen wird man daher nur am lebenden Kehlkopf entscheidende Versuche über seine physiologische Wirkungsweise anstellen können. Handelt es sich aber vorzugsweise um das unentbehrliche Studium der physikalischen Grundbedingungen, so kann man in den meisten Fällen die sogenannten künstlichen Kehlköpfe und zur Entscheidung der elementarsten Fragen noch einfachere physikalisch-akustische Apparate besser verwenden, als das komplizierte nicht mehr normal funktionierende ausgeschnittene Organ.“ Der letzte Satz ist jedoch dahin einzuschränken, daß künstliche Kehlköpfe und die einfachen akustischen Apparate unter falschen Voraussetzungen, z. B. mit Anwendung von Membranen, angefertigt sein können. Dann bietet doch der tote Kehlkopf unter gebührender Berücksichtigung der durch den Tod bewirkten Veränderungen ein zuverlässigeres Modell.

Die ersten Versuche am toten Kehlkopf sind von Ferrein [2]) gemacht und später ganz besonders eingehend von Johannes

---

[1]) J. R. Ewald, Die Physiologie des Kehlkopfs und der Luftröhre, Stimmbildung. P. Heymanns Handbuch der Laryngologie u. Rhinoskopie Bd. I, S. 172.

[2]) Joh. Müller, Handbuch d. Physiol. d. Menschen Bd. II, S. 207.

Müller [1]) ausgeführt. Beide Forscher haben gefunden, daß sich die Schwingungszahlen der Stimmlippen im allgemeinen nach den für die Saiten geltenden Gesetzen bestimmen. Bei Ferrein gaben die toten Stimmbänder in halber Länge die Oktaven, im Dritteil derselben die Quinte ihres ursprünglichen Tones. Eine Änderung der Länge der Stimmlippen um 2—3 Linien genügte zu allen Variationen der Tonhöhe, weil die sehr variable Spannung der hochgradig elastischen Stimmlippen die bei den Saiten nötigen Längenunterschiede ersetzt. Joh. Müller hat die Tonhöhen der toten Stimmbänder bei verschiedenen Spannungen untersucht, die durch Gewichte abgemessen wurden. Zu diesem Zweck befestigte er den toten Kehlkopf mit dem Ringknorpel und die durch eine Nadel quer durchstochenen aneinandergedrückten Stellknorpel auf einem senkrecht stehenden Brett, dann löste er die Gelenkverbindungen zwischen Ring- und Schildknorpel, um auf den letzteren einen Zug in der Richtung der Stimmlippen ausüben zu können. Das letztere geschah durch eine Schnur, welche über eine Rolle geleitet wurde und an ihrem unteren Ende eine Wagschale trug. In dieser Anordnung wurden die Stimmlippen bei verschiedener Spannung bzw. verschiedener Belastung der Wasgchale von unten her angeblasen. Hierbei hat J. Müller gefunden, daß die Stimmbänder ihre Schwingungszahlen „im allgemeinen“ wie die schwingenden Saiten ändern, aber nicht in den für diese geltenden bestimmten Zahlenverhältnissen. Je straffer eine Saite gespannt wird, um so größer wird die Zahl ihrer Schwingungen. Diese Schwingungszahlen (S) stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Sie verhalten sich wie die Quadratwurzeln der spannenden Gewichte (p), also

$$S : S_1 = \sqrt{p} : \sqrt{p'}$$

Wenn z. B. eine Saite bei der Spannung durch ein Gewicht von 1 kg die Schwingungszahl 5 hat, so muß sie, um die doppelte Schwingungszahl 2 S, also die Oktave des ersten Tones zu geben, mit $2^2 = 4$ kg, zur Erzielung der dreifachen Schwingungszahl, der Quinte, mit $3^2 = 9$ kg usw. gespannt werden. Die Stimmlippen dagegen erreichen nach J. Müller bei dieser quadratischen Zunahme der Gewichte in der Regel die theoretisch berechneten

[1]) Daselbst, S. 185 ff.

Töne nicht, sondern bleiben unter denselben, aber doch so, daß die Schwingungszahlen annähernd in dem eben angegebenen Verhältnis stehen. In weiteren Versuchen verkürzte J. Müller die Stimmlippen, indem er dieselben vor den Stimmfortsätzen an beliebiger Stelle mit einer Pinzette zusammendrückte, und stellte dann ihre Schwingungszahl sowohl bei gleichbleibender Spannung als auch bei beliebiger Abspannung, die er durch Zurückdrücken des Schildknorpels bewirkte, fest (S. 289). Das Ergebnis dieser Versuche war, daß tiefe Töne sich nicht nur mit langen, sondern auch mit verkürzten ja sehr verkürzten Stimmlippen erzeugen ließen, wenn nur mit der Verkürzung eine entsprechende Erschlaffung mit sich berührenden „Stimmlippen" einherging. Ebenso wurden hohe Töne sowohl mit verkürzten wie mit langen Stimmlippen erzielt, sofern die letzteren genügend stärker gespannt waren.

Durch Veränderung der Spannung der Stimmlippen in ihrer ursprünglichen horizontalen Richtung ließen sich die Töne im Umfang von 2 Oktaven ändern. Bei stärkerer Spannung wurden die Töne noch höher, aber unangenehm pfeifend und schreiend. In dieser Versuchsanordnung jedoch war die Spannung der Stimmlippen infolge der Lösung des Schildknorpels vom Ringknorpel unbegrenzt, während unter natürlichen Verhältnissen die Spannung der Stimmlippen durch die Bewegung des Schildknorpels nach unten begreiflicherweise beschränkt ist, weil sie mit der gegenseitigen Berührung des unteren Randes des Schildknorpels und des Bogens des Ringknorpels ihr Ende erreicht. J. Müller hat deshalb auch diese natürliche Spannung der Stimmlippen am toten Kehlkopf nachgeahmt und untersucht, indem er vorn außen am Schildknorpel dicht über dem Ansatz der Stimmlippen einen Faden befestigte, an dem eine Wagschale hing. Sobald die letztere mit Gewichten beschwert wird, verkleinert sich begreiflicherweise dadurch, daß der Schildknorpel nach unten gezogen wird, der Raum zwischen diesem und dem Bogen des Ringknorpels. Das letztere findet auch beim Lebenden während des Singens höherer Töne statt und läßt sich durch Einlegen der Fingerspitze zwischen diese Knorpel beobachten. Durch zunehmende Belastung der Wiegeschale konnten bei einem männlichen Kehlkopf auf diese Weise die Töne von ais bis d^3 erzielt werden. Bei den tieferen Tönen dieser Ton-Skala konnte mit je ½ Lot die Erhöhung um

½ Ton erreicht werden, während für die höheren Töne die Erhöhung um ½ Ton eine Mehrbelastung der Wiegeschale um 1 bis 3 Lot erforderte. Andererseits hat J. Müller auch die tiefen, unterhalb ais gelegenen Töne bis H zur Wahrnehmung gebracht, indem er die Stimmlippen künstlich erschlaffte bzw. verkürzte. Zu diesem Zweck leitete er einen mit Gewichten beschwerbaren Faden von dem Winkel des Schildknorpels rückwärts über eine Rolle und näherte somit den Schildknorpel aus seiner Ruhestellung den fixierten Stellknorpeln in mit den Gewichten zunehmendem Grade. Mit diesem Mechanismus ahmte er die entsprechende Wirkung der Stimm-Muskeln im lebenden Kehlkopf nach.

Die Resultate dieser klassischen Untersuchungen J. Müllers am toten Kehlkopf sind im Prinzip durchaus vorbildlich für die Erklärung der Vorgänge bei den lebenden Stimmlippen. Wie in dem letzten Versuche J. Müllers die Längsspannung der Stimmlippen durch Gewichte bewirkt und bestimmt wurde, so vollzieht sie sich im lebenden Kehlkopf mit Hilfe der Hebelwirkung des Schildknorpels bzw. des Ringknorpels durch die Zusammenziehungen der beiden Spannmuskeln — m. cricothyr. —, welche, wie die Gewichte, den Schildknorpel dem Ringknorpel nähern. Beim Lebenden kann aber diese „äußere Spannung" der Stimmlippen noch beeinflußt werden durch die Tätigkeit des jeder Stimmlippe eingelagerten Stimm-Muskels — m. thyr.-aryt. int. —, so lange die äußere Spannung noch eine Zusammenziehung dieser Muskeln gestattet. Dieser Vorgang ist durch die Versuche von Harless[1]) und Ewald[2]) experimentell erläutert worden. Harless hat den musc. rectus abdomin. vom Frosch zwischen zwei Klemmen befestigt, deren eine durch Vermittlung einer Rolle mit Gewichten belastet werden konnte. Der somit beliebig gespannte Muskel wurde durch ein unter ihm befindliches Rohr mit gleichmäßigem Luftstrom angeblasen. Dabei entstand ein der Spannung des Muskels entsprechender Ton. Sobald aber der Muskel durch den Induktionsstrom zur Kontraktion gereizt wurde, vertiefte sich deutlich der ursprüngliche Ton, weil mit der Zusammenziehung eine Verdickung des Muskels einhergeht.

---

[1]) Harless, Wagner's Handwörterbuch der Physiologie Bd. 1, S. 597. 1853.

[2]) Ewald, Heymann, Handbuch der Laryngologie u. Rhinologie Bd. 1, S. 202.

Dauerte der Versuch längere Zeit, so zeigte sich merkwürdigerweise bei elektrischer Reizung eine Erhöhung des Tones. Die Erklärung für diese letztere Tatsache findet Harless darin, daß der Rand des Muskels durch den permanenten Wind ausgetrocknet wird und damit eine stärkere Spannung erhält. „Die in Kontraktion geratenden Muskelbündel hinter ihm wirken aber dann als neue spannende Kräfte, während er selbst (sc. der Rand) einem Kautschukstreifen gleicht, dessen Töne immer bei Zunahme der Spannung höher werden.“ — Ewald ordnete seinen Versuch anders an, insofern er zwei musc. sartorii vom Frosch auf das dachförmig zugeschnittene Ende einer Röhre legte und mit einem ringsum schließenden Rahmen befestigte. Er hatte somit zwei künstliche Stimmlippen mit unveränderlicher äußerer Spannung hergestellt. Ewald fand nun, daß bei elektrischer Reizung des inneren Randes der Muskeln eine Erhöhung, bei Reizung der äußeren Partien desselben eine Vertiefung des Tones stattfand. Diese Beobachtung konnte auch Nagel[1]) mit etwas anderer Versuchsanordnung bestätigen. Aus diesen im allgemeinen übereinstimmenden Ergebnissen ist zu schließen, daß auch der musc. thyreo-arytaenoideus durch Kontraktion seiner ganzen Masse infolge von Verdickung seine Schwingungszahl vermindert, andererseits aber bei bereits vorhandener Spannung der Randpartie den Ton auch erhöhen kann. Wir müssen somit dem Stimm-Muskel — unter Beihilfe des m. thyr.-aryt. extern. — eine wesentliche Beteiligung an der Bestimmung der Schwingungszahlen der Stimmlippen zuschreiben. Folgerichtig kann seine Tätigkeit deshalb auch zur Erklärung der Verschiedenheit der Tonhöhen nicht nur bei der Männer- und Frauenstimme, sondern auch bei den unter sich verschiedenen Stimmlagen der Geschlechter herangezogen werden. Für die größere Tiefe der Männerstimme ist anzunehmen, daß beim Mann, wie alle anderen Organe und speziell der ganze Kehlkopf, auch der Stimm-Muskel stärker entwickelt ist, als beim weiblichen Geschlecht. Er vermag daher die für die tieferen Töne nötige Erschlaffung und Verdickung der Stimmlippen in höherem Grade zu bewirken, als der Stimm-Muskel des weiblichen und unentwickelten männlichen Kehlkopfes. Dementsprechend ist wohl auch die höhere Lage der Frauen- und

---

[1]) Nagel, l. c. S. 702.

Knabenstimme nicht allein durch die geringere Länge, sondern auch durch die geringere Masse der Stimmlippen begründet, deren Dicke ja wesentlich von der Entwicklung des Stimm-Muskels abhängt.

Der Unterschied zwischen den Tonhöhen der Männer- und der Frauenstimme tritt begreiflicherweise bei dem Vergleiche der höchsten oder tiefsten Töne der beiden Geschlechter ganz besonders deutlich hervor und umfaßt, wie bereits erwähnt ist, etwa eine Oktave. Wenn wir jedoch die Tonhöhen der männlichen und weiblichen Stimmlagen vergleichen, welche in der Fig. 35 als Baß, Bariton, Tenor, Kontra-Alt, Hoher Alt und Sopran nebeneinander graphisch dargestellt sind, so zeigt sich, daß jede Stimmlage nur 1½—2 Intervalle höher ist, als die ihr zunächst liegende tiefere. Es beträgt somit auch der Unterschied zwischen der höchsten Männerstimme (Tenor) und der tiefsten Frauenstimme (Kontra-Alt) nur etwa 1½ Intervalle. Es fragt sich nun, ob wir für diese relativ kleinen Höhen-Differenzen auch zunächst eine Verschiedenheit der Stimmlippenlänge zur Erklärung heranziehen dürfen, in dem Sinne, daß die höhere Stimmlage immer relativ kürzere Stimmlippen zur Voraussetzung hat. J. Müller scheint diese Frage zu bejahen, denn er sagt bei der Besprechung der Stimmlippenlängen des Mannes und des Weibes, daß Messungen der Längen der Stimmlippen im Maximum und Minimum ihrer Spannung an den Kehlköpfen verstorbener Bassisten, Tenoristen, Altisten und Sopranisten und auchder Kastraten für die Physiologie von größtem Interesse sein würden (S. 200). Dieser von J. Müller indirekt ausgesprochene Wunsch ist leider bisher nicht erfüllt worden und wird wohl in dieser Form wegen der großen Schwierigkeit, Kehlköpfe von verstorbenen Sängern zu erhalten, nie realisiert werden. Dagegen ist es sehr wohl möglich, mit Hilfe des Kehlkopfspiegels bei lebenden Sängern die Länge der Stimmlippen, sofern dieselbe sich ganz übersehen läßt, zu messen. Es bedarf dazu nur eines astronomischen Fernrohrs, in dem an der Stelle, wo sich das vom Objektiv entworfene reelle Bild befindet, eine Glasplatte mit eingraviertem Maß angebracht ist, wie in dem von mir angegebenen Apparat zur Photographie des Kehlkopfes [1]). Da das reelle Bild

[1]) A. Musehold, Ein neuer Apparat zur Photographie des Kehlkopfes. Deutsche med. Wochenschr. 1893.

und das Maß sich auf derselben Fläche befinden, so läßt sich die wirkliche Bildgröße bzw. die Stimmlippenlänge aus der Brennweite des Objektivs leicht berechnen.

Wenn aber auch vorläufig noch keine bestimmten Maße der Stimmlippen von den einzelnen Individuen vorliegen, so wissen wir doch von den Autoren (Luschka, Rauber-Kopsch, J. Müller), daß die Länge der Stimmlippen innerhalb jedes Geschlechtes große Schwankungen zeigt, und daß die oben angegebenen Längen der männlichen und weiblichen Stimmlippen nur dem Durchschnittsmaß entsprechen. J. Müller[1]) sagt ausdrücklich, daß er auch bei erwachsenen Männern einen großen Unterschied in der Länge der Stimmbänder gefunden habe. Es ist daher sehr wohl möglich, daß diese Längenunterschiede der Stimmlippen innerhalb jeden Geschlechtes mit den Tonhöhen der verschiedenen Stimmlagen in einem ursächlichen Zusammenhang stehen. Freilich müssen wir uns bei dieser Annahme dessen bewußt bleiben, daß für die Schwingungszahlen der Stimmlippen, bzw. der von ihnen erzeugten Tonhöhe, nicht nur ihre Länge maßgebend ist, sondern auch noch andere am Lebenden leider nicht meßbare Faktoren: die Elastizität der Stimmlippen, die Kraft der beiden Ring-Schildknorpel-Muskeln (musc. crico-thyr.) als äußerer Spanner der Stimmlippen, endlich die Stärke der Stimm-Muskeln (musc. thyr. aryt.-int.), welche durch ihre Zusammenziehung entweder zu der äußeren Spannung noch eine innere erzeugen (Ewald) oder unter Abnahme bzw. Ausschaltung der äußeren Spannung eine Erschlaffung der Stimmlippen bewirken.

Zehntes Kapitel.

Unterschied der Klangfarben bei den verschiedenen Stimmlagen und seine Ursachen — Untersuchungen über die Funktion der Stimmlippen und die Art ihrer Schwingungen — Geschichtliches — Die Untersuchungen von J. Müller, Liskovius und Carl Müller.

Es ist begreiflich, daß die genannten Muskelkräfte, welche der Regulierung der Spannungsverhältnisse der Stimmlippen dienen, in wechselseitig sehr verschiedener Abmessung tätig sein können, ja daß sie auch dieselbe Schwingungszahl mit verschiedener

[1]) J. Müller, Über die Kompensation der physischen Kräfte am menschl. Stimmorgan, S. 48.

Beteiligung zu bewirken imstande sind. So zeigt die Fig. 35, daß die Töne c′—e′ allen Stimmlagen gemeinsam sind. Aber das e′ z. B. klingt beim Tenor anders als beim Baß oder Bariton, und seine Klangfarbe ist noch mehr verändert beim Alt und Sopran. Dieser Unterschied der Klangfarben ist zweifellos z. T. durch eine Verschiedenheit des Ansatzrohres (s. Vokale) bedingt, außerdem aber beruht er darauf, daß die Stimmlippen für dieselbe Schwingungszahl von den einzelnen Stimmen mit verschiedenen Mitteln eingestellt werden. Für den Sopran ist, um bei demselben Beispiel zu bleiben, e′ ein relativ tiefer Ton und bedarf deshalb auch einer entsprechend nur geringen Kraft zur Einstellung der Stimmlippen, während derselbe Ton für die tieferen Stimmlagen eine allmählich zunehmende relative Spannung erfordert und zwar die größte im Baß, wo e′ bereits der höchste Ton ist. Die bei diesen Spannungsvorgängen verschiedene Beteiligung der Stimm-Muskeln, die ja die eigentliche Masse der Stimmlippen bilden und ihre Gestalt bedingen, hat auch entsprechende Änderungen der Form der Stimmlippen und zugleich ihrer Stellung zueinander zur Folge, weil die Stimmlippen mit zunehmender Zusammenziehung der Stimm-Muskeln sich wulstartig abrunden und dicker werden, so daß sie sich in der Stimmstellung mehr oder weniger fest berühren können. Die verschiedene Form und Stellung der Stimmlippen gegeneinander bedingt aber, wie wir noch näher zu erörtern haben, auch eine verschiedene Schwingungsart derselben, d. h. eine verschiedene Bewegung derselben innerhalb einer Schwingungsperiode, und diese Schwingungsform hat einen wesentlichen Einfluß auf die Klangfarbe der von den Stimmlippen erzeugten Töne. (Helmholtz, S. 32 ff.). Bei der Besprechung der metallenen Zungenpfeifen wurde erwähnt, wie die Töne der „aufschlagenden“ Zungen sich wesentlich unterscheiden von denen der „durchschlagenden“, daß ferner schmale Zungen andere Klänge erzeugen als breite (vgl. Kap. III), weil dabei die in gleicher Zeitperiode erfolgenden Schwingungen der Zungen den Luftstrom mehr oder weniger ganz, beziehungsweise in der einzelnen Schwingungsperiode mit verschiedener Geschwindigkeit unterbrechen. Breite Zungen, durch welche der Rahmenschlitz allmählich geöffnet wird, geben einen runden vollen Ton, schmale Zungen, welche infolge ihrer großen Beweglichkeit den Rahmenschlitz schnell und plötzlich öffnen, erzeugen scharfe Töne mit

vielen Obertönen. Aufschlagende Zungen geben infolge des vollständigen und längeren Abschlusses des Rahmenschlitzes härtere Klänge, als die durchschlagenden. Ähnlich ist auch die Klangfarbe der von den Stimmlippen erzeugten Klänge verschieden je nach der Art, wie sich ihre Schwingungen vollziehen.

Wie über die Funktion der Stimmlippen, so ist auch über die Art ihrer Schwingungen und die Deutung derselben viel geschrieben und gestritten worden. Es ist hier nicht der Raum dazu, auf die von den vielen Forschern verfochtenen Theorien näher einzugehen; ich verweise deshalb auf die ausführliche Zusammenstellung dieser Arbeiten von Liskovius (Physiologie der Stimme, 1846). Gleichwohl sei aus diesen Angaben auszugsweise erwähnt, daß der Altvater der Medizin, Hippokrates (430 v. Chr.), und der berühmte Arzt an der Fechterschule zu Pergamus Claudius Galenus (131 n. Chr.) den menschlichen Kehlkopf für eine Flöte hielten und somit den Schwingungen der Stimmlippen gar keine Bedeutung für die Tonerzeugung beilegten. Dieselbe Ansicht wurde von Einzelnen bis in die neuere und neueste Zeit vertreten. Nach Felix Savart (1825) verhält sich der Kehlkopf wie eine halbkugelförmige Jagdpfeife und vertritt als solche die Stelle eines Labialpfeifen-Mundstückes. Cyrillus (1734) und ganz besonders Anton Ferrein (1741) hielten das menschliche Stimmwerkzeug für ein Saiten- und Blas-Instrument zugleich. Die Lippen der Stimmritze seien die Saiten, die vorbeistreichende Luft der Bogen. — Dagegen hat aber Joh. Jac. Heinrici (1681) bereits die Erweiterung und Verengerung der Stimmritze für die vorzüglichste Ursache der Stimme gehalten. Die Rachen- und Mundhöhle wirke bei der Bildung und Veränderung der Stimme wie die Röhren der Trompeten, Posaunen, Flöten und anderer Blasinstrumente. — Der erste, der den Mechanismus der Stimmlippen mit einer „Pfeifenzunge" verglich, war Joseph Louis Roger (1803). Die Mund- und Rachenhöhle hielt er dementsprechend für einen Resonanzkanal. — Malgaigne (1831) betrachtet die Stimmbänder als Pfeifenzungen in dem Sinne, daß die Musc. thyr.-aryt. den Lippen des Trompetenbläsers gleichen, und die Kehlkopftaschen den Mundstückkessel der Trompete vertreten. Joh. Müller[1]) hält das menschliche Stimmorgan

[1]) J. Müller, Physiologie des Menschen Bd. 2, S. 149 ff.

auf Grund seiner Untersuchungen über die Schwingungen von gespannten elastischen Kautschuck-Membranen für ein Zungenwerk mit membranösen Zungen. In diese Kathegorie, die übrigens in der Musik keine Anwendung gefunden hat, sondern nur zum Studium der Vorgänge bei den menschlichen Stimmlippen konstruiert ist, reihte J. Müller auch die Stimmbänder des unteren Kehlkopfs der Vögel ein und die Lippen des Menschen beim Trompetenblasen.

So dankenswert die eingehenden Untersuchungen von J. Müller sind, so ist doch durch seine Auffassung der Stimmlippen als membranöse Zungen der häutige Charakter der Stimmbänder zu sehr in den Vordergrund gedrängt worden, ein Umstand, der, wie wir noch sehen werden, bei den weiteren Untersuchungen über die Physiologie der Stimmlippen hinderlich gewesen ist. Die Autorität J. Müllers brachte es begreiflicherweise mit sich, daß seine Ansicht Allgemeingut wurde und so z. B. auch C. Ludwig (Physiol. S. 665) zu dem Ausspruch bewogen hat, man solle die Stimmbänder lieber „Stimmhäute" nennen. — Erst im Jahre 1877 erfuhr diese Auffassung eine berechtigte Einschränkung durch den Physiker Carl Müller in seiner Arbeit: Untersuchungen über einseitig frei schwingende Membranen und deren Beziehung zum menschlichen Stimmorgan[1]). Hier kommt C. Müller zu dem Resultat, daß bei der Erzeugung der tieferen Töne des Brustregisters die Schwingungen der Stimmlippen mit denen der Membranen in keinem Zusammenhang stehen, und daß die Stimmlippen an sich mit nichts weniger als mit Membranen in physikalischem Sinne zu vergleichen sind, zumal sie aus wulstförmigen Muskelmassen bestehen, welche eine keilförmige Gestalt haben und von elastischem Gewebe überzogen sind. Bei den höheren Tönen dagegen und besonders im Falsettregister „liegt der Vergleich näher", weil die Stimmlippen durch die Spannung ihre Gestalt so ändern, daß sich der keilförmige Rand derselben immer mehr zuschärft. Deshalb seien Versuche mit Membranen nur mit den Schwingungsverhältnissen der Stimmlippen im Falsett vergleichbar. Dieser Ansicht entsprechend stellt C. Müller zum Schluß die Hypothese auf: „Die Fallsettöne der menschlichen

---

[1]) Von der Philosophischen Fakultät zu Marburg als Preisschrift gekrönt.

Stimme entstehen nicht durch Grundschwingungen der Stimmbänder, sondern durch Partialschwingungen derselben, so daß auf der Oberfläche jeder einzelnen Lippe eine Knotenlinie (oder mehrere) vorhanden ist". Als Stütze seiner Hypothese betrachtet er die von Lehfeldt[1]) zuerst entdeckte und von J. Müller bestätigte Tatsache, daß bei den höheren Tönen, welche den Falsettönen der menschlichen Stimme gleichen, nur die Ränder der Stimmbänder schwingen, während die tiefen, den Brusttönen gleichenden Töne durch Schwingungen der Stimmbänder in ihrer ganzen Breite erzeugt werden. Es erscheint aber C. Müller unmöglich, daß während der Randschwingungen nicht auch die übrigen Teile der Stimmlippen mitschwingen, und deshalb nimmt er an, daß wie bei den Membranen auch bei den Stimmlippen die an sich stärkeren Randschwingungen von gleichzeitigen, aber schwächeren Schwingungen der äußeren Stimmlippenteile durch eine Knotenlinie getrennt sind. Wir werden auf diese Annahme später bei der Besprechung der Oertel'schen Untersuchungen noch zurückkommen müssen. Vorher aber haben wir noch die für unsere Kenntnisse über die Art der Stimmlippenschwingungen sehr wichtigen Untersuchungen von J. Müller und von Liskovius zu besprechen.

Liskovius[2]) hat am toten Kehlkopf nach Wegnahme der Taschenbänder beim Anblasen der Stimmbänder ein Aufblähen ihrer Oberfläche beobachtet, das mit dem Ton entsteht und schwindet, und zwar nicht nur bei stärkeren, sondern auch bei schwachen Tönen. „Zwar kann man bei Tonschwingungen nicht die einzelnen Schwingungen mit dem Auge unterscheiden. Man kann also auch diesem Aufblähen nicht ansehen, ob es ein fortgesetztes Emporstehen oder ein Auf- und Abgehen, also in diesem Falle ein Schwingen ist. Wohl aber spricht für das letztere folgende Probe. Bringt man einen Tropfen Wasser auf den äußersten Teil des Ventrikelgrundes (gemeint ist die Stimmlippenoberfläche, d. Verf.), so verhält er sich wegen der nach außen absteigenden Richtung jener Fläche dort zu alleräußerst und zeigt auf einem Spiegel ein Zittern, welches ebenfalls mit dem Tone entsteht und solange als dieser dauert. Ein Beweis, daß bei den Tönen des Kehlkopfes der ganze

[1]) Lehfeldt, Nonnulla de vocis formatione. Diss. Berlin 1835.

[2]) Liskovius, Physiologie der menschlichen Stimme, 1846, S. 38 ff.

Ventrikelgrund (Stimmlippenoberfläche) auch bis zu seinen äußersten Teilen in Schwingungen begriffen ist." Es ist sehr bemerkenswert, daß bereits Liskovius sich einer besonderen optischen Methode bedient hat, um die Schwingungen der Stimmlippen zu beobachten. Die Töne der Brust- und Fistelstimme (S. 42) werden nach seiner Ansicht dadurch erzeugt, daß die Gießkannenknorpel bei der Bruststimme vorwärts geneigt sind, bei der Fistelstimme mehr oder weniger rückwärts gezogen werden. „Daher sind die Stimmbänder bei der Bruststimme schlaff, bei der Fistelstimme straff. Daher sind die Schwingungsbögen der „Stimmhäute" bei der Bruststimme größer, als bei der Fistelstimme, d. h. die „Stimmhäute" schwingen bei der Bruststimme weiter aus, als bei der Fistelstimme. Daher die viel stärkere und viel weiter mitgeteilte Erschütterung bei der Bruststimme, als bei der Fistelstimme. Daher auch der härtere Klang der Bruststimme und der weichere, sanftere der Fistelstimme".

Wir entnehmen aus diesen ausgezeichneten Beobachtungen, die ich um ihre Bedeutung zu wahren, mit den eigenen Worten des Autors wiedergegeben habe, daß auch Liskovius die Stimmlippen vorwiegend für Häute gehalten hat. Unter dem Einfluß dieser Annahme hat er die Frage der Beteiligung der Stimm-Muskeln bei den Tönen des Brust- und Falsettregisters außer Acht gelassen, beziehungsweise den Ausfall der Tätigkeit dieser Muskeln im toten Kehlkopf nicht ausdrücklich berücksichtigt, sondern seine Aufmerksamkeit wesentlich auf den Spannungsgrad der „Häute" gerichtet.

Joh. Müller bemerkt dagegen (S. 175), daß die Ursache der Brust- und Falsettöne noch in etwas anderem liegen müsse als in dem Spannungsunterschiede, weil man am toten Kehlkopf bei gewisser schwacher Spannung der Stimmbänder durch stärkeres Blasen einen Brustton, durch schwaches Blasen einen Falsetton erzeugen könne, der allerdings höher sei, als der Brustton und bis zu einer Oktave differieren könne. Diese andere Ursache findet J. Müller in der von Lehfeldt entdeckten Tatsache, daß bei den Falsettönen nur die freien Ränder und bei den Brusttönen die ganzen Stimmlippen mit großen Exkursionen schwingen. Wegen der geringeren Breite der Randschwingungen könne man im Falsett die Spalte der Stimmritze meist sehr scharf unterscheiden, während sich bei den Brusttönen der „Schimmer der

Schwingungen beider Stimmbänder vermischt". Die tieferen Brusttöne bis zum H erreicht J. Müller durch Annäherung des Schildknorpels an die Stellknorpel — also durch Verkürzung beziehungsweise Erschlaffung der Stimmbänder. Durch allmähliche Entfernung dieser Knorpel von einander, d. h. durch zunehmende Spannung der Stimmbänder wurden die höheren Brusttöne erzeugt, aber nur im Umfang von einer Oktave, demnach vom tiefsten Tone H gerechnet bis etwa zum h. Bei weiterer Spannung sprang der Brustton in die Fistelstimme über. Doch konnten auch noch höhere Brusttöne erzielt werden, sobald J. Müller den „Raum unter den Stimmbändern" durch Seitendruck auf die unteren schrägen Flächen der Stimmbänder „verengerte" (Vgl. Fig. 36). Dieser Verengerung legte J. Müller für die Theorie der Brusttöne eine große charakteristische Bedeutung bei. Zum Beweise dafür entfernte er beiderseits die Musc. thyr.-aryt. bis auf die elastische Kehlkopfhaut und drückte mit plattem Skalpellstiele die letztere beiderseits gegen die Mittellinie des Kehlkopfes. Beim Anblasen nahmen nunmehr die Brusttöne an Höhe zu, und gleichzeitig zeigte sich, daß die gegeneinander genäherten elastischen Membranen mitschwingen. Obwohl er aber selbst hervorhebt, daß, wie hier die Skalpellstiele, beim Lebenden die Musc. thyr.-aryt. wirken müssen, welche an den Seiten der Enge wie „muskulöse Lippen" liegen, so sieht er nicht in der Kontraktion dieser Muskeln beziehungsweise in der dadurch erhöhten inneren Spannung der „Stimmbänder" die primäre und alleinige tonerhöhende Ursache, sondern wesentlich in der sekundären Verengerung des „nächsten Raumes unter den Stimmbändern". J. Müller ist von seiner Theorie, welche die Stimmbänder mit Membranen vergleicht, so befangen, daß ihm bei der Deutung seines obigen Experimentes die wertvolle Beobachtung, daß mit den „Stimmbändern" gleichzeitig die gegeneinander genäherten elastischen Membranen des verengerten unteren „Vorraumes der Stimmritze" mitschwingen, nicht wichtig genug erscheint, um die „Stimmbänder" mit den „elastischen Membranen", die ja doch in der Wirklichkeit die unteren schrägen Flächen der Stimmlippen sind, als ein anatomisch wie mechanisch untrennbares Ganzes zu betrachten. Sein Versuch beweist doch so eindeutig wie nur möglich die Beteiligung und für die Erzeugung der Bruststimme unbedingt notwendige Mitwirkung der Musc. thyr.-aryt. Dieselben bedingen

aber durch ihre Zusammenziehung in erster Linie die Schwingungszahl der Stimmlippen. Daß dabei gleichzeitig der Raum zwischen den unteren Stimmlippenflächen verengert wird, ist eine unausbleibliche Folgeerscheinung der genannten Muskelkontraktion, da sich jeder Musc. thyr.-aryt., wie alle Muskeln, bei der Zusammenziehung verkürzt und dicker wird. Das letztere sowie daß durch die Verkürzung des Musc. thyr.-art. das schlaffe Stimmband auch straffer wird, weiß natürlich J. Müller und hebt es auch weiterhin hervor, indem er die Wirkung der Musc. thyr. aryt. auf die schlaffen Stimmbänder mit der des Mundringmuskels (sphincter oris) auf die Spannung der Lippen beim Trompetenblasen vergleicht (S. 197) und „die Elastizität der Stimmlippen nicht bloß von der Ausspannung der Stimmbänder nach vorn und hinten, sondern auch von dem Grade der Tension ihres äußeren muskulösen Umfanges abhängig" sein läßt. Es ist bemerkenswert, daß hier J. Müller das Wort „Stimmlippen" braucht und hinzufügt: „Die Stimmlippen beschränken sich nicht auf die elastischen Bänder, sie sind nach innen elastisch-bandartig, nach außen muskulös". Obwohl er aber hier in den Stimmlippen die Stimmbänder und die Musc. thyr.-aryt. zu einem Sammelbegriff und gewissermaßen zu einem Organ zusammenfaßt, so hält er doch diese beiden Bestandteile der Stimmlippen in funktioneller Beziehung immer auseinander, wie auch aus seinen für die Theorie der Brusttöne aufgestellten Leitsätzen hervorgeht. Da die letzteren von außerordentlicher Wichtigkeit sind, so gebe ich dieselben hier wörtlich wieder.

„Die Theorie der Brusttöne ist demnach diese (S. 198):

1. Die Bänder schwingen in ganzer Breite, auch die mit ihnen verbundenen Membranen und der Musc. thyr.-aryt.

2. Die tiefsten Brusttöne werden erhalten bei größter Abspannung der Stimmbänder durch Rückwärtsbewegen des Schildknorpels.

3. Bei so großer Abspannung sind die Stimmbänder nicht allein ganz ungespannt, sondern im Zustande der Ruhe auch runzelig und faltig; aber sie werden durch das Blasen ausgedehnt, und dieses gibt ihnen die zum Schwingen nötige Tension.

4. Indem man die Abspannung geringer werden läßt und dem Schildknorpel erlaubt, sich nach vorn zu bewegen oder dem

Zuge des elastischen Ligam. crico-thyr. med. nachzugeben, steigen die Brusttöne bis gegen eine Oktave.

5. Bei der mittleren, ruhigen Stellung des Schildknorpels und der Cartilagines aryt., wenn die Stimmbänder weder gespannt noch gefaltet sind, hat der Kehlkopf die Disposition zu seinen leichtesten mittleren Brusttönen (zwischen den mittleren und tiefsten Brusttönen liegen die der gewöhnlichen Sprache).

6. Die zweite Oktave tritt schon, indem aufwärts entsprechende Fisteltöne neben ihr liegen, mit diesen in Kollision; letztere werden vermieden und die Brusttöne bis zur letzten Grenze gesteigert durch Zusammendrückung der Stimmbänder von den Seiten und Verengerung des Aditus glottidis inferior vermöge des Musculus thyreo-arytaenoideus, dann auch wieder, wie schon vorher durch stärkeres Blasen.

7. Bei den Brusttönen kommen außer den Stimmbändern auch die musculöse Tension der Stimmlippen durch den Musculus thyreo-arytaenoideus in Betracht.

8. Bei den Falsettönen schwingt bloß der innere oder Randteil der Stimmbänder; sie hängen in Hinsicht der Höhe von der Spannung der Stimmbänder ab."

Wir sehen daß J. Müller auch hier in Abs. 1, 6, 7 u. 8 die Tätigkeit der Stimmbänder von der des Musc. thyreo-aryt. gesondert anführt. Dies tut er in Konsequenz seiner der damaligen Zeit entsprechend einseitigen Auffassung der Stimmlippen als membranöse Zungen und unter dem Einfluß seiner Grundanschauung, welche ihn bei allen seinen Untersuchungen geleitet hat: daß es sich bei den Zungentönen „nicht um die Schwingungen der Luft in dem Ansatzrohr handelt, sondern um die Schwingungen an der einfachen Zunge selbst" (S. 174). J. Müller hielt die schwingenden Zungen und im Vergleich mit ihnen auch die Schwingungen der „Stimmbänder" für das tönende Prinzip und konnte sich den lichtvollen Untersuchungen und Auseinandersetzungen E. H. und W. Webers[1]) nicht anschließen, welche bereits im Jahre 1825 ausgesprochen hatten, daß die Zunge einer Zungenpfeife „nicht ein selbsttönender Körper ist, der durch Stöße der benachbarten Luft den Ton mitteilt (denn wenn sie in die Höhe gezogen und dann losgelassen wird, so gibt sie nur einen schwachen Ton, der

[1]) Weber, Wellenlehre, Leipzig 1825, S. 287.

die Luft in der Pfeife nicht zum Selbsttönen bringen kann), sondern es ist ein Körper, der, indem er die Pfeife abwechselnd schließt und öffnet, die außen verdichtete Luft nötigt, die Luft in der Pfeife in regelmäßigen Intervallen zu stoßen und nicht zu stoßen. Folgen diese Stöße schneller aufeinander, als ungefähr 32 mal in der Sekunde, so entsteht ein hörbarer Ton."

Elftes Kapitel.

Untersuchungen der Stimmlippen-Schwingungen am Lebenden mit dem Kehlkopfspiegel — Garcia — Merkel — Unterschiede der Bilder im Brust- und Falsettregister — Die Stroboskopie, ihr Prinzip und ihre Untersuchungsmethode.

Die Untersuchungen von J. Müller am toten Kehlkopf enthalten trotz seiner irrigen Ansicht über die Entstehung des Tones im Prinzip fast alles, was uns die Beobachtung am lebenden Kehlkopf zeigt, so daß ihre tatsächlichen Ergebnisse gewissermaßen als experimentelle Beweise für die mit Hilfe des Kehlkopfspiegels an den schwingenden lebenden Stimmlippen erhobenen Befunde herangezogen werden müssen. Wie J. Müller am toten Kehlkopf bei den Tönen, welche der Bruststimme glichen, den Schimmer der Schwingungen beider Stimmbänder infolge ihrer Schwingungen in der ganzen Breite „vermischt" sah, während bei den dem Falsettregister entsprechenden Tönen die Spalte der Stimmritze meist scharf unterschieden werden konnte, so zeigt auch die Beobachtung der lebenden Stimmlippen ein ähnliches Bild. Die Schwingungen der Stimmlippen beim Brustton, erschüttern dieselben wie am toten Kehlkopf in ihrer ganzen Masse und Breite und verwischen ihre Trennungslinie zu einem grauen Streifen. Bei einem Falsetton nimmt diese Trennungslinie eine spindelförmige Gestalt an und erscheint dunkler. Auch hier sieht man die Stimmlippenoberfläche erzittern, aber deutlich bei weitem geringer, als während eines Brusttones. Bei den höheren Falsettönen wird der spindelförmige Schatten zwischen den Stimmlippen allmählich kürzer und schmaler und rückt gleichzeitig immer mehr in die vordere Hälfte der Glottis. Diese Bilder sind z. T. bereits von dem Erfinder des Kehlkopfspiegels

Garcia[1]) ganz besonders aber von C. L. Merkel[2]) festgestellt und gedeutet worden. Es ist begreiflich, daß dem Gesanglehrer Garcia bei der Deutung der Bilder manche Irrtümer untergelaufen sind, weil ihm für eine maßgebende wissenschaftliche Beurteilung des Gesehenen die physiologischen Grundlagen fehlten, welche Merkel nach den Vorarbeiten zu seiner „Antropophonik" in reichem Maße zu Gebote standen. Gleichwohl ist sehr bemerkenswert, daß Garcia[3]) nach seinen Untersuchungen die Stimme in W. Weberschem Sinne entstehen läßt: „Die Stimmbänder.... schließen den Durchgang für die Luft ab und bieten derselben einen Widerstand. Sobald sich die Luft hinreichend angesammelt hat, trennt sie die Stimmbänder voneinander und bringt eine Explosion hervor, aber in demselben Augenblick begegnen sie sich kraft ihrer Elastizität, und weil der Druck von unten aufgehört hat, wieder, um sofort eine neue Explosion zu veranlassen. Eine Reihe dieser Kompressionen und Expansionen, durch den Druck der angesammelten Luft (unter den Stimmbändern) und ihre Wirkung auf die Glottis verursacht, bringen die Stimme hervor.—" „Es ist nicht nötig, daß die Glottis, um einen Explosionslaut zu erhalten, nach ihrem jemaligen Öffnen wieder vollständig geschlossen werde; es genügt, daß sie der (Ausatmungs-) Luft einen Widerstand entgegensetzt, der geeignet ist, ihre Elastizität zu entwickeln." In den weiteren Auseinandersetzungen nimmt Garcia an, daß bei dem eben beschriebenen Vorgang durch gänzlichen Abschluß der Glottis zwischen den einzelnen Explosionen die „brillanten" Brusttöne entstehen und, wenn die Glottis den Durchtritt nur teilweise abschließt, die „verschleierten" Töne des Falsettregisters erzeugt werden. Diese von Garcia vertretene Ansicht hat sich nach den weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen als durchaus richtig erwiesen.

---

[1]) Manuel Garcia, geb. 1775 zu Sevilla, erfand als Londoner Gesanglehrer im Sept. 1854 während eines vorübergehenden Aufenthaltes in Paris den Kehlkopfspiegel und reichte 1855 der Royal Society of London seine „Physiological observations on the human voice" ein.

[2]) Dr. C. L. Merkel, Die Funktionen des menschlichen Schlundes und Kehlkopfes u. s. w. nach eigenen pharyngo-laryngoskopischen Untersuchungen. Leipzig 1862.

[3]) Manuel Garcia, Beobachtungen über die menschliche Stimme. Monatsschrift f. Ohrenheilkunde (Übersetzung) 1872.

Ebenso deutet auch Merkel das am eigenen Kehlkopf beobachtete Spiegelbild. Im „Brustregister" ist die phonische Glottis, d. h. der von den Stimmbändern begrenzte Teil der Stimmritze beim Tonansatz linienförmig, beide Glottisränder bilden zusammen eine gerade Linie, welche bei jedem Rückschwung der nach „auf- und auswärts" schwingenden Stimmbänder wiederhergestellt wird. Die Glottis wird in diesem Augenblick geschlossen, wie auch Garcia annimmt. Im „Falsettregister" ist die phonische Glottis beim Tonansatz „spalt- oder lanzettförmig" geöffnet und schwarz, weil die nach außen ausgebogenen Stimmbandränder sich beim Zurückschwingen nicht berühren. Diese fundamentalen Unterschiede des Mechanismus beim Brust- und Falsettregister erklärt Merkel[1]) damit, daß bei den Brusttönen der Musc. vocalis aktiv gespannt ist, bei den Falsettönen dagegen nicht. Diese letztere Tatsache hat ja, wie wir bereits erfahren haben, J. Müller in seinem 7. und 8. Leitsatz auch ausgesprochen.

Aus dem Gesagten entnehmen wir, daß zu den von J. Müller gegebenen Darstellungen der mechanischen Vorgänge beim Brust- und Falsettregister durch Garcia's und Merkel's Spiegeluntersuchungen des lebenden Kehlkopfs wesentlich nur ein Neues hinzugekommen ist, nämlich die Theorie, daß die phonische Glottis bei den Rückschwingungen der Stimmbänder im Brustregister momentan geschlossen wird, im Falsettregister dagegen als lanzettförmiger Spalt offen bleibt. Joh. Müller hat diese Deutung nicht ausgesprochen, obwohl er am toten Kehlkopf schon alles gesehen hatte, was Garcia und Merkel mit dem Kehlkopfspiegel an den lebenden Stimmbändern feststellen konnten. Die Erklärung für diese Zurückhaltung ist in der Tatsache gegeben, daß die Frage, wieweit die Schwingungsweiten der Glottisränder nach außen und innen reichen, bzw. durch welche Schwingungsvorgänge die beobachteten Glottisformen bedingt werden, mit den bloßen Augen nicht entschieden werden kann. Unsere Gesichtsempfindungen verlaufen so träge, daß zwei aufeinanderfolgende Lichteindrücke, deren Zeitintervall weniger als $^1/_7$ Sekunde[2]) beträgt, bereits ineinander

[1]) Merkel, Die Funktionen des menschl. Schlund- u. Kehlkopfes, S. 113. Leipzig 1862.

[2]) Bunge, Lehrbuch der Physiologie des Menschen, Bd. 1, S. 105.

verschwimmen. Rei den menschlichen Stimmlippen spielen sich aber die einzelnen ganzen Schwingungen in $^{1}/_{81,47}$ (E) bis $^{1}/_{1034,61}$ (c‴) Sekunde ab! Wir bedürfen daher, um einzelne Phasen einer Schwingung zu Gesichte zu bekommen, was ja zur Beurteilung der Schwingungsform durchaus notwendig ist, noch einer optischen Methode, welche die Schwingung scheinbar so verlangsamt, daß wir ihren Verlauf mit dem Auge verfolgen können. Dieses ermöglicht die Stroboskopie.

Das physikalisch-optische Instrument für diese Untersuchungsmethode, das Stroboskop[1]), ist 1832 von Prof. Stampfer in Wien erfunden worden und besteht wesentlich aus einer an der Peripherie in gleichen Zwischenräumen mit gleich großen Schlitzen versehenen Scheibe, welche, auf der Achse eines Uhrwerks oder Elektromotors befestigt, in gleichmäßige Umdrehungen von bestimmter Schnelligkeit versetzt wird. Während dieser Rotationen beobachtet das Auge durch einen Schlitz den in Bewegung befindlichen und für die Untersuchung genügend beleuchteten Gegenstand (Fig. 38).

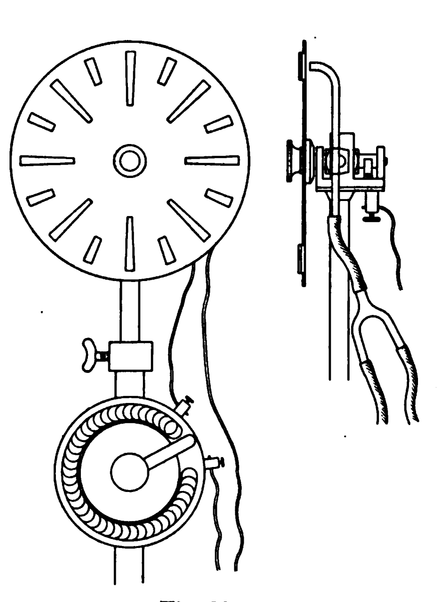


Fig. 38.

Das Prinzip des Instrumentes beruht auf der Tatsache, daß ein Lichteindruck in unserem Auge nach der Beseitigung der Lichtquelle noch eine kurze Zeit andauert. Wir werden daher von einem stillstehenden Gegenstand, den wir abwechselnd, nicht länger als $^{1}/_{7}$ Sekunde, verdecken, bei seiner Betrachtung durch die rotierende durchbrochene Scheibe einen dauernden ununter-

---

[1]) Annalen d. Physik u. Chemie 1834, Bd. 32.

brochenen Lichteindruck empfangen; er erscheint uns nur dunkler, weil begreiflicherweise durch die abwechselnden Verdeckungen des Gegenstandes die von ihm in unser Auge gelangende Lichtmenge verringert wird. — Geben wir dem Gegenstand während jeder Verdeckung desselben eine andere Stellung, so erscheint er, weil die Lichteindrücke sich unmittelbar aneinanderschließen, in Bewegung, und zwar in um so schnellerer, je größer der Unterschied in den einzelnen Stellungen ist. — Umgekehrt können wir einen in Bewegung befindlichen Gegenstand, wenn wir ihn immer in derselben Stellung durch die Scheibenlöcher zu sehen bekommen, d. h. wenn immer dieselbe „Bewegungsphase" dem Auge gezeigt wird, scheinbar stillstehen sehen, und zwar in der Stellung, die für das Auge gerade unbedeckt, d. h. sichtbar bleibt. Dabei wird vorausgesetzt, daß auch die Bewegung des Gegenstandes selbst in der Zeitfolge gleichmäßig ist. Eine solche Bewegung können wir graphisch darstellen, indem wir eine Abszissenachse in eine Anzahl gleicher Abschnitte teilen, um die gleichen Zeiten darzustellen, in denen sich die gleichmäßigen Bewegungen abspielen. Die letzteren werden in der Zeichnung dadurch zur Anschauung gebracht, daß man in der Mitte eines jeden Abschnittes gleiche Ordinaten aufträgt und deren Enden mit den Teilpunkten der Abszissenachse verbindet. Wir erhalten damit eine gleichmäßig auf- und absteigende Linie, welche einer periodisch gleichmäßigen Bewegung entspricht (Fig. 39).

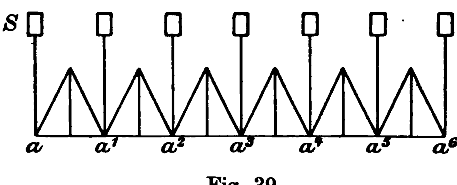


Fig. 39.

Will man nun die Bewegungsphase im Punkte a zur Anschauung bringen, d. h. den bewegten Gegenstand in der diesem Punkte entsprechenden Stellung stillstehen sehen, dann muß begreiflicherweise die Bewegung der Scheibe so eingerichtet werden, daß jedes Scheibenloch S immer nur den Punkt a zeigt. Es muß dann die Zeit, während welcher das Auge durch den Zwischenraum zwischen zwei Löchern verdeckt wird, gleich sein derjenigen, in welcher die Bewegung des Gegenstandes von a zu a′ stattfindet. Die Zahl der Beleuchtungsunterbrechungen muß in der Zeiteinheit gleich sein der Zahl der Bewegungen, deren jede aus einem Auf- und Ab-

steigen besteht. Unter diesen Bedingungen können wir den bewegten Gegenstand ebenso an jedem beliebigen Punkte in einer anderen Bewegungs- oder Schwingungsphase anscheinend stillstehend sehen und betrachten.

Wenn wir aber den bewegten Gegenstand an den einzelnen Punkten scheinbar stillstehend betrachten, so erhalten wir noch keine Vorstellung von der Art, dem Charakter seiner Bewegung. Letzteres ist erst möglich, wenn die Bewegung des Gegenstandes beziehungsweise die Schwingung scheinbar so verlangsamt wird, daß wir sie mit dem Auge verfolgen können. Dies erreichen wir leicht, wenn die Rotation der stroboskopischen Scheibe etwas langsamer wird, als in dem eben erwähnten Falle, d. h. wenn die

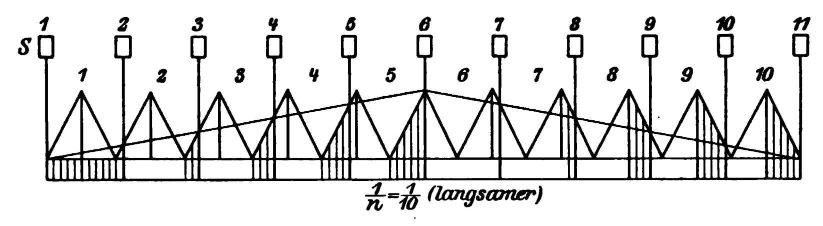


Fig. 40.

Zahl der Lichtunterbrechungen kleiner ist, als die der Schwingungen. Zur Veranschaulichung dieses Vorganges nehmen wir wieder die obige Zeichnung zur Hilfe (Fig. 40).

Bei der Voraussetzung, daß die Lichtunterbrechung um $^1/_{10}$ der Dauer einer auf- und absteigenden Bewegung länger ist, wird beim Vorbeigang des zweiten Loches die zweite Schwingung bereits um $^1/_{10}$ ihrer ganzen Dauer über den Punkt a_1 hinaus sein, beim dritten Loch die dritte Schwingung um $^2/_{10}$, beim vierten Loch die vierte um $^3/_{10}$ usw. Das sechste Loch trifft die sechste Schwingung in der Mitte, wo sie mit $^5/_{10}$ abgelaufen ist, also in ihrer höchsten Erhebung, während erst am Ende der elften Schwingung das elfte Loch wieder den Punkt oder die Phase a zeigt. Wir erhalten somit, wenn wir die Punkte der Bewegung, welche die einzelnen Scheibenlöcher gezeigt haben, miteinander verbinden, eine künstlich verlangsamte Schwingung, welche sich aus je einer Phase von 11 Schwingungen zusammensetzt und mit 10 Unterbrechungen durch 11 Scheibenlöcher zur An-

schauung kommt. Setzt man nun für den in unserem Beispiel angenommenen Schnelligkeitsunterschied von $^1/_{10}$ den allgemeinen Wert $^1/_n$, so wird der obigen Darstellung gemäß nach n + 1 Schwingungen (11) und n Unterbrechungen (10) die durch das erste Loch beobachtete Phase a im n + 1ten Scheibenloch (11ten) wieder erscheinen und damit die scheinbar verlangsamte Schwingung vollendet sein. Dabei ist zu bemerken, daß das n + 1te Loch gleichzeitig das erste Loch für die Beobachtung der nächsten verlangsamten Schwingung ist.

Lassen wir umgekehrt die Lichtunterbrechung um $^1/_{10}$ der wirklichen Schwingung kürzer dauern, dann erhalten wir ein anderes Bild (Fig. 41).

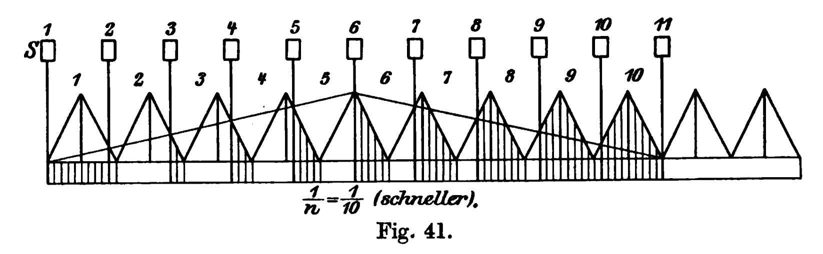


Fig. 41.

Hier trifft das zweite Scheibenloch noch eine Phase der ersten wirklichen Schwingung, und zwar $^1/_{10}$ vor ihrem Ende, das dritte Loch die zweite Schwingung $^2/_{10}$ vor ihrer Vollendung usw. Die 6. Öffnung zeigt die Phase der 5. Schwingung $^5/_{10}$ vor ihrem Ende, d. h. ihre Mitte, die höchste Elevation, das 10. Loch trifft die 9. Schwingung $^9/_{10}$ vor ihrem Ende, während das 11. Loch die Endphase derselben 9. Schwingung zeigt. Es setzt sich also hier die scheinbar verlangsamte Schwingung bei 10 = n Unterbrechungen aus 9 = n — 1 wirklichen Schwingungen zusammen. Die so erzielte künstliche Schwingung läuft also zunächst um 2 wirkliche Schwingungszeiten schneller ab, als in dem vorigen Fall. Ferner aber kommt sie umgekehrt zur Anschauung, indem sich der aufsteigende Schenkel der künstlichen Schwingung aus Phasen der absteigenden Bewegungen der wirklichen Schwingungen zusammensetzt, und der künstliche absteigende Schenkel Phasen der aufsteigenden Bewegungen der wirklichen Schwingungen zeigt. Es ist deshalb für korrekte Untersuchungen geboten, der stroboskopischen Scheibe eine langsamere Bewegung zu geben, so daß in der Zeit-

einheit die Zahl der Unterbrechungen geringer ist, als die der Schwingungen, beziehungsweise daß die Unterbrechung etwas länger dauert, als die wirkliche Schwingung. Diese Differenz muß eine geringe sein, damit eine möglichst langsame künstliche Schwingung zustande kommt. Soll diese jedoch ein treues Abbild der wirklichen Schwingung sein, so ist noch eine Bedingung zu erfüllen: n muß durchaus eine gerade Zahl sein. Ist dieselbe ungerade, dann zeigt die künstliche Schwingung nicht die höchste Erhebung der wirklichen und gibt somit ein unzureichendes falsches Bild der Bewegung, wie aus Fig. 42 hervorgeht.

Angenommen $^1/n$ sei $= ^1/_5$, so würde die dritte wirkliche Schwingung die Phase am Ende ihres zweiten Fünftels zeigen, bei der vierten Schwingung würde das Ende ihrer dritten Fünftels sichtbar sein. Da dieser Punkt aber bereits hinter der Mitte der Schwingung gelegen ist, wo sich die höchste Erhebung der Bewegung befindet, so wird die letztere nicht zur Anschauung gebracht. Im übrigen würde aber auch hier nach n + 1 Schwingungen beziehungsweise n Unterbrechungen die erste Wiederkehr einer Phase eintreten.

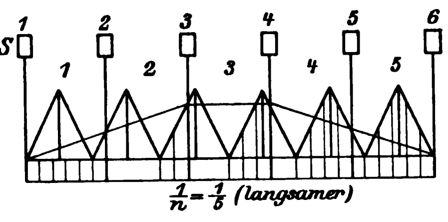


Fig. 42.

Bei der stroboskopischen Untersuchung der Schwingungen der Stimmlippen während der Stimmgebung ist es notwendig, zunächst immer den in Fig. 39 dargestellten Fall, d. h. den scheinbaren Stillstand der Stimmlippen in einer bestimmten Phase anzustreben. Das geschieht dadurch, daß man den Ton, welchen man beim Anblasen der rotierenden Scheibe oder wie bei meinem Stroboskop[1]) (Fig. 38) durch Auskultation derselben mit einem Hörschlauch erhält, dem gesungenen Ton gleich macht, beziehungsweise daß die Zahl der durch die Scheibe bewirkten Lichtunterbrechungen mit der Schwingungszahl des gesungenen Tones in der Zeiteinheit über-

[1]) A. Musehold, Stroboskopische u. photographische Studien über die Stellung der Stimmlippen im Brust- und Falsett-Register. Archiv f. Laryngol, Bd. VII, 1898.

einstimmt. Dann erst ist zur weiteren Untersuchung der Stimmlippenschwingungen der Gang der Scheibe durch eine geeignete Hemmvorrichtung oder bei elektrischem Antrieb durch einen Rheostaten um eine möglichst kleine Differenz zu verlangsamen, damit auch die künstliche Schwingung sich möglichst langsam vollzieht. Zu diesem Zwecke ist es zunächst notwendig, die Scheiben nicht aus schwerem Metall zu fertigen, weil dadurch ihr Beharrungsvermögen so groß wird, daß sich ihre Geschwindigkeit nicht schnell genug in dem erwünschten Grade ändern läßt. Das beste Material für die Scheiben bleibt dünnes Papp-Papier, aus dem man sich jederzeit die Scheiben nach Belieben zurechtschneiden kann. Bei meinem Stroboskop verwende ich nur Papp-Scheiben mit radiär gestellten schlitzförmigen Löchern, damit die ganze Stimmlippenlänge zu gleicher Zeit und gleich kurz beleuchtet wird. Aus demselben Grunde ist es notwendig, das senkrecht stehende Spiegelbild der Stimmlippen auch nur dort durch die Scheibe zu betrachten oder zu beleuchten, wo die Schlitze eine senkrechte Stellung einnehmen. Nur so kann man die wirkliche Schwingungsform zu Gesichte bekommen. Würde dagegen die Beobachtung oder Beleuchtung durch einen horizontal gerichteten Schlitz stattfinden, so erscheinen die einzelnen Punkte der Stimmlippenlänge dem Auge nacheinander und dementsprechend während der Schwingung in bereits fortgeschrittener Phase, so daß das Bild der Schwingungslinie der Stimmlippenränder verzerrt wird. Wenn z. B. in der Fig. 43, welche schematisch übertrieben die Glottis (g—g) bei größter seitlicher Ausweichung der Stimmlippenränder darstellt, der untere Rand S-S′ des quergestellten Schlitzes vom Punkte a des Stimmlippenrandes zu b bewegt wird, dann ist der Stimmlippenrand bereits wieder auf dem Rückschwung nach innen begriffen und etwa bei b′ angelangt, während er in der Höhe von c schon wieder die Mittellinie c′ erreicht, vorausgesetzt, daß der Scheibenschlitz nur $^1/_4$ der Glottis-Länge beleuchtet. Dadurch erfährt der geöffnete Teil der Glottis eine scheinbare Verkürzung und gibt ein falsches Schwingungsbild. — Um die künstlich verlangsamte Schwingung recht deutlich beziehungsweise möglichst

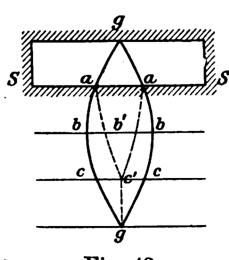


Fig. 43.

scharf zur Anschauung zu bringen, müssen die Scheibenschlitze möglichst schmal gemacht werden. Im Allgemeinen genügt es jedoch, wenn die Zwischenräume zwischen den Schlitzen 2 oder 3 mal so breit sind wie die Schlitze selbst. Schon mit dieser Breite ist aber die Stärke der Lichtquelle auf $^1/_3$ oder $^1/_4$ reduziert. Es muß daher zu stroboskopischen Untersuchungen ein möglichst helles Licht benutzt werden. Ich gebrauche jetzt das Licht einer kleinen von Leitz zu mikroskopischen Zwecken konstruierten Bogenlampe und kann dieselbe durchaus empfehlen, doch genügt auch durchaus eine Nernstlampe. Selbst die Beleuchtung mit Gasglühlicht, sofern dasselbe durch geeignete Linsen zusammengehalten wird, führt zum Ziele. Weniger wichtig ist die Art der Aufstellung des Stroboskops.

Bei meinen Untersuchungen über die Stimmlippenstellung im Brust- und Falsett-Register hatte ich den Reflektor vor der Scheibe befestigt, so daß die letztere dicht vor dem Auge rotierte. Derselben Anordnung bediente sich Oertel. Viel bequemer ist die Untersuchung, wenn man wie Réthi[2]) die stroboskopische Scheibe zwischen die Lichtquelle und den Reflektor aufstellt, aber so, daß die Schlitzzone der Scheibe möglichst von der Spitze des durch eine Sammellinse zusammengehaltenen Lichtkegels getroffen wird, damit die Lichtquelle möglichst ganz ausgenützt wird. — Ich habe die stroboskopische Untersuchung auch bei der von Czermak, Stoerk und Voltolini geübten Durchleuchtung des Kehlkopfs ausgeführt. Hierbei aber darf das Licht nur eine begrenzte Stärke haben, weil bei großer Helligkeit die Differenzierung des Glottisspaltes von den Stimmlippenrändern sehr schwierig ist. Ich halte deshalb für diese vielversprechende Untersuchungsmethode eine Vorrichtung für unbedingt notwendig, welche die Lichtstärke nach Belieben zu ändern gestattet. Am einfachsten geschieht dies mittels einer durch Luftdruck verstellbaren Blende.

Übrigens ist auch die Stroboskopie bei innerer Beleuchtung des Kehlkopfs mit nicht zu unterschätzenden Schwierigkeiten verknüpft. Zunächst muß der Untersuchende so viel musikalisches

---

[1]) Oertel, Das Laryngostroboskop und seine Anwendung in der Physik, Physiol. u. Medizin. Archiv f. Laryngol., Bd. 3, 1898.

[2]) L. Rethi, Experimentelle Untersuchungen über den Schwingungstypus u. den Mechanismus der Stimmbänder bei der Falsettstimme. Wiener Klin. Rundschau 1897, 5 u. 6.

Gehör besitzen, daß er den von dem Untersuchten gesungenen Ton mit dem der Scheibe zu vergleichen beziehungsweise in Übereinstimmung zu bringen imstande ist. Dieser Scheibenton wird allgemein wie bei der Seebeck'schen Sirene durch Anblasen der Scheibe hörbar gemacht. Dieses wiederholte Anblasen ist aber sehr lästig und störend, besonders sobald sich in dem Blaserohr oder -schlauch Kondenswasser angesammelt hat. Ich habe deshalb bei meinem Stroboskop von vornherein eine Einrichtung getroffen, mit welcher der Scheibenton von dem Untersuchten und dem Untersuchenden zu gleicher Zeit abgehört werden kann. Dies geschieht mit je einem Schlauch, dessen eines Ende in den Gehörgang gesteckt wird, während das andere auf ein für zwei Schläuche gabelförmig geteiltes Glasrohr aufgeschoben ist (Fig. 38). Das einfache Ende der Glasröhre befindet sich dicht vor der mit Schlitzen versehenen Zone der stroboskopischen Scheibe. Um aber den gewünschten Ton aus dem Geschwirr der rotierenden Scheibe herauszuheben, habe ich die in der Bewegungsrichtung vorangehenden Ränder sämtlicher Schlitze flügelartig abgebogen, wie die Fig. 44 es zeigt.

Fig. 44.

Bei dieser Vorrichtung findet während der Rotation infolge der Luftverdünnung hinter jedem Schlitzflügel ein der Zahl der Scheibenschlitze entsprechend unterbrochener und deshalb tönender Luftstrom statt, der von der glatten Seite a der Scheibe nach der Flügelseite b derselben gerichtet ist. Man kann sich von dieser Tatsache leicht überzeugen, wenn eine Lichtflamme auf der glatten Seite gegen die Schlitzzone gehalten wird; sie flackert sofort mit langausgezogener Spitze durch die Schlitze hindurch. Dieses dauernde Abhören des Scheibentones ist umso notwendiger, als Hensen und Klünder[1]) durch ein optisches Verfahren

[1]) Klünder, Ein Versuch, die Fehler zu bestimmen, welche der Kehlkopf beim Halten eines Tones macht. Diss. Marburg 1872. — Archiv f. (Anat. u.) Physiol 1879, S. 119. — Hensen, Archiv für (Anat. u.) Physiologie 1879. S. 155.

feststellen konnten, daß kein Sänger imstande war, eine gegebene Tonhöhe längere Zeit festzuhalten, und andererseits Gutzmann[1]) nachgewiesen hat, daß, wenn eine auch unmusikalische Person einen Ton längere Zeit zu halten hatte, während gleichzeitig auf dem Harmonium der möglichst passende Ton dauernd ertönte, nur zu Anfang des Versuches stärkere Schwebungen vorhanden waren. Weiterhin wußte selbst der Unmusikalische durch Veränderung seiner Stimmbandspannung geradezu automatisch die Schwebungen fast völlig zu beseitigen. Trotzdem aber ist es durchaus wünschenswert, daß dem Untersuchenden am Stroboskop eine Vorrichtung am besten in Form einer in ihrer Wirkung fein abmeßbaren Bremse zu Gebote steht, damit er die Beobachtung störende Differenzen zwischen dem gesungenen und dem Scheiben-Ton jederzeit selbst ausgleichen kann. Aus diesem Grund bleiben auch die einfachen Apparate, welche mit Hilfe der kleinen käuflichen Elektromotoren hergestellt sind und sich durch entsprechende Rheostaten in der Gangart leicht regulieren lassen, die besten. Im übrigen aber ist Übung und Geduld und sorgfältige Beobachtung mit strenger Selbstkritik die Hauptbedingung für eine erfolgreiche Untersuchung.

Zwölftes Kapitel.

Stroboskopische Untersuchungen der schwingenden Stimmlippen am Lebenden von Oertel, Koschlakoff, Rethi, und A. Musehold — Meine photographischen Aufnahmen der schwingenden Stimmlippen im Brust- und Falsettregister — Die verschiedene Form der Glottis und der Stimmlippen — Die sich daraus ergebenden Rückschlüsse auf den Spannungs-Mechanismus.

Die stroboskopische Untersuchungsmethode ist, obwohl ihr Prinzip und ihre Verwendbarkeit für die Beobachtung von Schwingungen schon im Jahre 1873 von E. Mach[2]) eingehend hervorgehoben wurde, erst relativ spät und leider in zu geringer Verbreitung in die laryngologische Wissenschaft aufgenommen

[1]) H. Gutzmann, Physiologie der Stimme und Sprache, Braunschweig 1909, S. 44.

[2]) E. Mach, Optisch-akustische Versuche. Die spektrale und stroboskopische Untersuchung tönender Körper. Prag 1873.

worden. Nachdem Carl Müller[1]) im Jahre 1876 in seiner Arbeit über die Beziehungen freischwingender Membranen zum menschlichen Stimmorgan sich auch der stroboskopischen Untersuchungsmethode bedient hatte, wurde die letztere zuerst von Oertel[2]) 1878 zur Untersuchung des lebenden Kehlkopfes eingeführt. Nach Oertel sind die Schwingungen der menschlichen Stimmlippen am Lebenden noch von Koschlakoff[3]), Rethi[4]) und von mir[5]) stroboskopisch untersucht worden. Obwohl diese Arbeiten sämtlich dasselbe Ziel hatten, so wurden sie z. T. unter verschiedenen Gesichtspunkten angestellt und führten demgemäß teilweise zu verschiedenen Deutungen.

Oertel[6]) legte seiner Stroboskopie der lebenden Stimmlippen leider stroboskopische Untersuchungen zugrunde, welche er an schwingenden Membranen gemacht hatte. Demgemäß schweben ihm bei seinen Beobachtungen an den schwingenden Stimmlippen immer die Schwingungstypen der Membranen als Paradigma vor und verleiten ihn zu irrtümlichen Schlüssen. So entbehrt ihm die allgemein verbreitete Annahme, daß im Falsettregister nur die Stimmbandränder schwingen, jeder physikalischen Begründung (S. 10). Es werde hier vielmehr — wie bei seinen Membranen — jede Stimmlippe durch eine schwachovale Linie (Fig. 45 A K), die als „Knotenlinie“ aufzufassen ist, in zwei entgegengesetzt schwingende Zonen zerlegt: eine schmale Randzone (Fig. 45 B a), und

---

[1]) l. c. S. 141.

[2]) M. J. Oertel, Über eine neue laryngoskopische Untersuchungsmethode des Kehlkopfes. — Laryngostroboskopische Beobachtungen über die Bildung der Register bei der menschlichen Stimme. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 1878, Nr. 5 u. 6.

[3]) Koschlakoff, (St. Petersburg), Über die Schwingungstypen der Stimmbänder. Pflügers Archiv, Bd. 38, 1886, S. 228.

[4]) L. Réthi, Experimentelle Untersuchungen über den Schwingungstypus und den Mechanismus der Stimmbänder bei der Falsettstimme. Wiener Klin. Rundschau 1897, 5 u. 6. — Untersuchungen über die Schwingungsform der Stimmbänder bei den verschiedenen Gesangregistern. Sitzungsber. d. kaiserl. Akad. d. Wissenschaften in Wien, Mathem.-naturw. Klasse, Bd. CVI, Abt. III, Febr. 1897.

[5]) A. Musehold, Stroboskopische und photographische Studien über die Stellung der Stimmlippen im Brust- und Falsett-Register. Archiv f. Laryngologie, Bd. VII, 1898.

[6]) Oertel, Das Laryngo-Stroboskop und die laryngo-stroboskopische Untersuchung. Archiv f. Laryngol., Bd. III, 1895.

den breiteren nach außen gelegenen Teil b. Die Randzone schwingt auf und abwärts und zeigt auf dem Querschnitt an der breitesten Stelle der Stimmlippe (Fig. 45 AM) die größte Exkursion. Gleichzeitig befindet sich der nach außen von der „Knotenlinie“ befindliche Teil b in entgegengesetzter Schwingungsphase, und zwar mit größter „Auf- und Abwärtsbewegung“ in seinen mittelsten Punkten (c), während diese Bewegung nach der Knotenlinie hin und nach auswärts abnimmt, um schließlich = 0 zu werden. In einem Falle mit hoch ausgebildetem Falsett beobachtete Oertel sogar zwei Knotenlinien. In der irrigen Auffassung, daß die Bildung dieser Knotenlinien bei den Stimmbändern wie bei den an einem Ende eingeklemmten Stäben vor sich geht, sieht er dementsprechend im Brustregister, wo jedes Stimmband angeblich in seiner ganzen Länge und Breite, „auf-“ und „abwärts“ schwingt, die „Knotenlinie“ an der äußeren Insertion des Stimmbandes (Fig. 46 K), während sich am Rande desselben der Schwingungsbauch B befindet, ebenfalls mit breitester Exkursion an der breitesten Stelle des Stimmbandes.

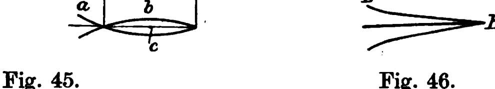


Fig. 45. Fig. 46.

Über das Verhalten der Glottis äußert Oertel nur, daß sie im Brustregister enger ist, als bei der Falsettstimme.

Koschlakoff sah im Brustregister die Stimmbänder in ihrer ganzen Masse schwingen und schätzte sie dicker und breiter, als im Falsettregister, wo sie ihm länger, schmäler und an den Rändern dünner erschienen. Bei der Falsettstimme konnte er wie Oertel deutliche Schwingungen nur in der von einer „Knotenlinie“ begrenzten Randzone beobachten. Die auswärts dieser Knotenlinie gelegenen Teile der Stimmbänder führten jedoch nur sehr schwache Bewegungen aus, so daß die von Oertel hier beobachteten entgegengesetzten Schwingungen der lateralen Teile nicht sichtbar waren.

Mit vollem Recht bemerkt darauf Rhéti, daß Koschlakoff, wenn er diese entgegengesetzten Schwingungen außerhalb der

„Knotenlinie" nicht feststellen konnte, er auch nicht von einer „Knotenlinie" sprechen dürfe. Bekanntlich bildet ja eine Knotenlinie immer die Grenze zwischen Wellenberg und Wellental, also zwischen zwei entgegengesetzten Schwingungsphasen. Réthi hat weder eine „Knotenlinie" noch die dazu gehörigen entgegengesetzten Schwingungen sehen können (l. c. S. 9). Nach seinen Beobachtungen schwingt im Falsettregister der freie Rand der Stimmbänder in einer wenige Millimeter breiten Strecke nach aufwärts, „dann rückt die Schärfe dieses Randes aber als eine Kante nach außen, während der freie Rand wieder abwärts geht, und diese Kante läuft, indem sie allmählich verstreicht, eine kurze Strecke weit wellenförmig lateralwärts ab." Diese Wellen verlaufen jedoch nicht immer parallel dem freien Stimmbandrande, sondern oft schief, so daß sie mit diesem einen nach vorn offenen Winkel bilden[1]). Das Charakteristische für das Falsettregister findet er demnach darin, daß hier erstens nur die Stimmbänder in einer wenige Millimeter breiten Zone schwingen, und zweitens, „daß jede Schwingung des eigentlichsten freien Randes sich als allmählich abklingende Welle über die Oberfläche eine kurze Strecke weit fortsetzt". Diese Wellen sind aber beim Brustregister nicht vorhanden. Hier schwingen die Stimmlippen ausgiebig „in viel breiterer" Zone. Doch hält Réthi die Vorstellung für berechtigt, daß dabei die Stimmbänder auf- und abwärtsschwingen, so daß eine abwechselnde „Erweiterung und Verengerung "der Stimmritze eintritt. Bei den tiefen Tönen des Mannes sah er die Weite der Stimmritze von 0 bis zu 1 oder 1,5 mm wechseln, doch war nicht zu entscheiden, ob der Verschluß der Glottis ein vollkommener ist, obwohl die Trennung der Stimmlippen durch eine Linie gegeben erscheint.

Wenn ich nun zu den Resultaten meiner Untersuchungen übergehe, so muß ich betonen, daß dieselben sich vor allem auf das Verhalten der Glottis beim Brust- und Falsettregister und dann erst auf die Schwingungen der Stimmlippen bezogen. Mehrere photographische Aufnahmen des Kehlkopfes, die ich bei Bariton- und Tenorsängern mit explosivem Magnesium-Blitzlicht, also

---

[1]) Zur Erklärung der letzteren Tatsache verweise ich auf die im Bilde Taf. 2. von hinten strahlenförmig nach außen verlaufenden Schleimhautfalten auf den Stimmlippen.

mit sehr kurzer Beleuchtung gemacht habe, bewogen mich zu dieser Reihenfolge der Betrachtungen.

Die Kehlkopfphotographieen zeigten im Brustregister nach oben gewölbte wulstige Stimmlippen, die im Bilde nur durch eine dünne Linie getrennt waren (Taf. VI. 11). An diese Linie schließen sich seitwärts allmählich heller werdende Schattenlinien an, welche das Relief der Rundung der Stimmlippenoberfläche in ihrem Querdurchmesser zur Anschauung bringen und die Glottis-Linie in einer trichterförmigen Vertiefung erscheinen lassen, wie das in Fig. 47 a angedeutet ist. Die Stimmlippen sind so dicht aneinander gelagert, daß man mit Garcia und Merkel annehmen muß, die Glottis sei geschlossen. Ist Schleim vorhanden, so verteilt sich dieser, nachdem er an der vorderen und besonders an der hinteren Kommissur hervorgetreten ist, über die ganze Oberfläche der Stimmlippen, um allmählich nach deren äußeren Seiten abgeschüttelt zu werden, als Anzeichen dafür, daß die Stimmlippen, wie bereits Lehfeldt ausgesprochen hat, bei der Bruststimme als Ganzes schwingen (Taf. VI. 12). Wird derselbe Brustton (Bariton c′) weniger laut gesungen, so erscheint die Trennungslinie weniger dünn und der Schleim hat die Neigung, in gewissem Abstande von der Glottis eine Linie zu markieren (Taf. VI. 13 und Taf. III, 6). Dabei werden die Stimmlippen flacher, bewahren aber zunächst noch ihre wulstige Gestalt und zwar so charakteristisch, daß man die Vergrößerung auf Taf. III, 6 quer gerichtet für ein Paar Mundlippen halten könnte.

Die im Querdurchmesser wulstige Wölbung der Stimmlippen und mit ihr die gegenseitige Berührung ihrer Ränder ist dadurch bedingt, daß, wie bereits J. Müller angenommen hat, im Brustregister die für die Schwingungen nötige Spannung der Stimmlippen wesentlich durch die Tätigkeit der Musc. thyreo-arytaenoidei reguliert wird. Infolge der hierbei statthabenden Verdickung dieser Muskeln werden die Stimmlippenränder aneinandergedrängt und erhalten demgemäß im Querschnitt die in Fig. 47 skizzierte Form.

Fig. 47.

Beim Übergange vom Forte zum Piano vollzieht sich aber eine Änderung des Spannungsmechanismus der Stimmlippen, um die

Tonhöhe zu erhalten. Da nämlich mit zunehmender Stärke des tonerregenden Windstromes die Schwingungszahl der Stimmlippen erhöht, bei abnehmender Windstärke aber vermindert wird, so muß die von J. Müller so genannte „Kompensation der physischen Kräfte" stattfinden, um das musikalisch unerwünschte Mißverhältnis zwischen Windstärke und Tonhöhe zu beseitigen. Diese „Kompensation" geschieht in dem Sinne, daß beim „Crescendo" die Spannung der Stimmlippen so weit abnimmt, als die Stärke des Luftstromes zunimmt, und umgekehrt beim „Decrescendo". Die für das letztere notwendige Vermehrung der Spannung vollzieht sich nun in der Weise, daß unter Nachlaß der Zusammenziehung der Musc. thyr.-arytaenoidei die Tätigkeit der Musc. cricothyreoidei zunimmt. Bei der Zunahme dieser äußeren Spannung werden gleichzeitig die Oberflächen der Stimmlippen immer flacher (Taf. VI. 13 u. 17), ihre Ränder aber bleiben zunächst noch in gegenseitiger Berührung und lassen die Glottis geschlossen erscheinen. Während dieses Vorganges wird jedoch begreiflicherweise der Glottis-Schluß auch allmählich lockerer. Die Folge davon ist, daß die Berührungslinie zunächst tiefer zu liegen kommt und damit von steileren Rändern flankiert wird, welche den Schatten neben der Glottislinie verdunkeln und somit die letztere breiter erscheinen lassen (Fig 47 b). Wird aber die äußere Spannung der Stimmlippen so weit erhöht, daß sie das Übergewicht erhält, dann kommt, wie in den Versuchen von J. Müller am toten Kehlkopf, kein Brustton mehr zustande, der Ton erhält den weichen Charakter der Falsettstimme. Die Ursache dieser Klangänderung liegt wesentlich in dem Verhalten der Glottis.

Wenn man zwei Stücke eines mäßig langen Gummischlauches so nebeneinander legt, daß sie sich in ihrer ganzen Länge berühren, und sie dann in ihrer Längsrichtung zunehmend spannt, so wird die gegenseitige Berührung schließlich aufgehoben, und an der Stelle der Berührungslinie erscheint jetzt ein langelliptischer frei durchsichtiger Spalt. Der letztere kommt dadurch zustande, daß die Gummistränge, wie alle elastischen Körper, bei ihrer Dehnung das Bestreben haben, sich senkrecht zur Zugrichtung zu verdünnen beziehungsweise zu verschmälern, und zwar am meisten in der Mitte. Derselbe Vorgang spielt sich auch bei den Stimmlippen während ihrer äußeren Spannung ab. Die Spaltbildung tritt hier aber eher und stärker ein, weil die Außenseite der Stimmlippen

angewachsen ist. Sobald nun ihre Spannung durch die Musc. crico-thyreoidei das Übergewicht erreicht, hört der Glottis-Schluß auf, und die Stimmlippenränder treten auseinander, um die für das Falsettregister charakteristische spaltförmige Glottis zu bilden. Diese allmähliche Änderung des Spannungsmechanismus der Stimmlippen beim Übergange vom Brust-zum Falsettregister erzeugt die Töne der sogenannten „Mittelstimme". Daß im Verlaufe dieses Vorganges die Spannung der Stimmlippen zunimmt und im Falsettregister stärker ist, als im Brustregister, hat bereits Müller auf Grund seiner Versuche angenommen. Zudem aber konnte Réthi (l. c. 11) auch am Lebenden durch Abtasten der Stimmlippen mit der Sonde nachweisen, daß sich die Stimmlippen während eines Falsettons infolge gesteigerter Spannung resistenter anfühlten. Diese vergrößerte Spannung ist zweifellos der im Falsettregister überwiegenden Tätigkeit der Musc. cricothyreoidei zuzuschreiben. Zum Beweise der Richtigkeit dieser Annahme konnten Jörgen Möller[1]) und Fischer an Röntgenphotographien zeigen, daß beim Falsetton der obere Rand des Ringknorpels dem Schildknorpel näher steht, als bei demselben im Brustregister gesungenen Tone. Die Annäherung der beiden Knorpel geschieht aber nachweislich durch die Musc. cricothyreoidei. Nur der Tätigkeit dieser Muskeln ist es somit zuzuschreiben, daß die Stimmlippenoberfläche im Falsettregister keine Wulstung wie im Brustregister, und die Glottis die Gestalt eines mit der Tonhöhe wechselnden annähernd spindelförmigen Spaltes zeigt (Taf. II 3). Auf dem Bilde kommt der Glottisspalt in der Form einer schwarzen Linie zur Erscheinung, die seitwärts von je einem grauen Streifen begrenzt wird. Die letzteren entsprechen den infolge der Schwingungen verwaschenen Rändern der Stimmlippen. In gleicher Weise zeigen auch die Bilder auf Taf. I. 2 u. II. 4 (Bariton c'), Taf. IV. (Bariton u. Tenor e'), Taf. VI. 14, 15. (c'' eines Bariton, der sich zum Fistelsänger ausbilden wollte) die Glottis offen. Auf dem letzgenannten Bilde sind die Stimmlippen wegen der durch die Höhe des Tones bedingten hochgradigen Spannung so gedehnt, daß sie stark gespannten Gummistreifen ähnlich sind. Die übrigen Details dieser Bilder sollen bei der Besprechung meiner stroboskopischen Untersuchungen erklärt werden.

---

[1]) Vgl. Gutzmann, Phys. d. Stimme u. Sprache, S. 39.

Dreizehntes Kapitel.

Meine stroboskopischen Untersuchungen und Photographien — Deutung der Ergebnisse — Die Schwingungsform der Stimmlippen im Brust- und Falsettregister.

Den durch die Blitzphotographie gegebenen Befund kontrollierte ich nunmehr durch die stroboskopische Untersuchung. Nicht nur bei den photographierten, sondern auch bei einer großen Reihe anderer Fälle fand ich auf diese Weise volle Bestätigung dessen, was mir die genannten Bilder zeigten. Im Brustregister wurde die Glottis beim Rückschwung der Stimmlippen immer geschlossen. Um diese Tatsache auch der objektiven Betrachtung zugänglich zu machen, bemühte ich mich, die Schwingungsphase des Glottisschlusses stroboskopisch zu photographieren. Ich stellte zu diesem Zweck den Gang der stroboskopischen Scheibe so ein, daß ich beim Singen des c′ die Stimmlippen dauernd aneinandergepreßt sah. Dabei stellte sich heraus, daß diese Phase verhältnismäßig leicht stroboskopisch festgehalten werden konnte, während es ungemein schwer ist, beim Brustton die Stimmlippen in der Phase ihrer größten Entfernung voneinander anscheinend

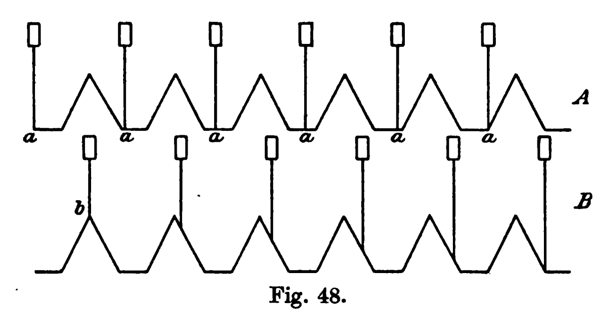


Fig. 48.

still stehen zu sehen. Ich schließe daraus, daß die Phase des Glottisschlusses länger dauert, als die der Öffnung der Glottis, und daß demgemäß der Schwingungsvorgang ungefähr der in Fig 48 A u. B gegebenen Kurve entspricht[1]).

---

[1]) Vgl. A. Musehold, Über die Bedeutung und Grenzen der Kehlkopfphotographie. Verhandlungen der Laryngologischen Gesellschaft zu Berlin 27. XI. 1903, S. 42.

Die horizontalen Linien bezeichnen den Schluß der Glottis, die Erhebungen deren Öffnungen. Aus der Kurve A ist ersichtlich, daß auch bei etwa nicht völliger Übereinstimmung des gesungenen Tones mit dem der stroboskopischen Scheibe immer noch Punkte a des Glottis-Schlusses zur Ansicht kommen. Bei Betrachtung des Punktes b dagegen, der die größte Entfernung der Stimmlippen voneinander anzeigt, würde schon eine geringe Differenz der beiden Töne eine andere Phase erscheinen lassen. Die Photographie auf diesem stroboskopischen Wege stellt selbstverständlich dieselbe Phase mehrerer hintereinanderfolgender Schwingungen dar, also durch wiederholte Belichtungen derselben photographischen Platte mehrere Bilder aufeinander, deren Zahl von der Kürze des Blitzes abhängt. Die aus der Betrachtung der sichtbaren Vorgänge nur nach Schätzung gezeichnete Kurve Fig. 48 stimmt im Prinzip auffallend überein mit der Kurve, welche P. Grützner (l. c. S. 28 Fig. 18) von den Schwingungen einer aufschlagenden Zunge durch graphische und optische Untersuchungsmethoden erhalten hat. In der Tat sind die Schwingungsverhältnisse bei den Stimmlippen im Brustregister und den aufschlagenden Zungen in bezug auf die Dauer der Luftunterbrechungen ähnlich. Wir wissen, daß die aufschlagende Zunge beim Aufschlagen auf den Rahmen unter Erzittern (Schnarrwerk) auf diesem liegen bleibt und den Rahmenschlitz so lange schließt, bis sie von einem neuen aus dem Ansatzrohr auf sie rückwirkenden Impuls „einschlagend" abgehoben wird, um der Druckluft des Stiefels zur neuen Schwingung eine Angriffsfläche zu bieten.

Auch die Stimmlippen schließen dadurch, daß sie durch Muskeltätigkeit mehr oder weniger fest aneinandergepreßt werden, so lange die zwischen ihnen liegende Glottis, bis eine erneute Kraft sie auseinanderdrängt. Diese Kraft kommt aber nicht durch die Schwingungen im Ansatzrohr, wie bei der „einschlagend" schwingenden aufschlagenden Zunge, sondern, weil die Stimmlippen „gewissermaßen" ausschlagend schwingen, von der unter den Stimmlippen befindlichen Druckluft. Die stroboskopische Photographie des während der Schwingungen festen Glottis-Schlusses zeigt die Taf. III 5. Beide Stimmlippen erscheinen hier als zwei wulstige fest aneinandergepreßte Körper, und quer gestellt betrachtet, wie die fest aufeinander gelegten Mundlippen.

Trotz der großen Schwierigkeit gelang es mir nach vielen vergeblichen Versuchen, auch die Phase der Glottisöffnung während desselben Brusttones so lange einzustellen, daß eine Blitzaufnahme möglich wurde. Dieses sehr wertvolle Bild ist Nr. 18 auf Taf. VI. Die Glottis bildet hier einen breiten Spalt, die Stimmlippenränder erscheinen in schmalen strangförmigen Wülsten etwas aufgeworfen, so daß wir von der Form auf den Schwingungsmechanismus schließen dürfen. — Aus dem Bilde Taf. III 5 können wir unschwer den Durchschnitt der Stimmlippen während des Brusttones konstruieren, zumal wir wissen, daß durch die starke Zusammenziehung des Musc. vocalis auch die unteren Flächen der Stimmlippen nach der Mittellinie vorgebaucht sein müssen und somit jene Enge im unteren Kehlkopfraum bewirken, welche J. Müller als charakteristisches Merkmal für das Brustregister hinstellt. Gleichwohl habe ich, um die Gestalt des unteren Kehlkopfraumes während der Stimmstellung der Stimmlippen zur Anschauung zu bringen, Leichen-Kehlköpfe nach J. Müller hergerichtet und bei leicht angespannten Stimmlippen Wachs in den unteren Kehlkopfraum gegossen. Die erhaltenen Wachsabgüsse wurden in der Mitte quer durchschnitten und gaben so ein instruktives Bild von dem Verlauf und der Neigung der unteren Stimmlippenflächen. Die in Fig. 49 abgebildeten 4 Querschnitte solcher Abgüsse sind der genauen Wiedergabe wegen nach einer Photographie gezeichnet.

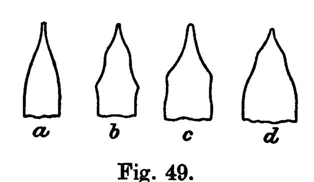


Fig. 49.

Der Durchschnitt mit der steilen Neigung der Seiten (a) stammt von einem etwa 17 jährigen Mädchen, der zweite (b) von einer etwa 40 jährigen Frau, während c und d Männern im Alter von 33 und 40 Jahren entnommen sind. Wenn wir diesen Durchschnitten die zugehörigen Stimmlippen-Oberflächen hinzuzeichnen, so ergeben sich daraus die entsprechenden Querschnitte der Stimmlippen. Da jedoch die letzteren nur der Länge nach gespannt wurden, ohne gleichzeitigen Seitendruck (J. Müller), so zeigen uns diese Querschnitte nur den Durchschnitt der Stimmlippen ohne Kontraktion der Musculi thyreo-arytaenoidei und entsprechen somit prinzipiell dem Zustand im Falsettregister, so daß die Neigung der unteren Stimmlippenflächen im Brustregister beim Lebenden noch steiler angenommen werden muß.

Gleichwohl demonstrieren sie deutlich den für den Schwingungsmechanismus der Stimmlippen so sehr wichtigen steil-schrägen Verlauf der unteren Stimmlippenflächen.

Die durch die Kontraktion des Musc. vocalis bewirkten Wulstungen lassen sich unter der Leitung der Photographie leicht einzeichnen. In Fig. 50 habe ich nun auf diesem Wege den Stimmlippendurchschnitt der Bilder Taf. III 5 und VI 18 konstruiert.

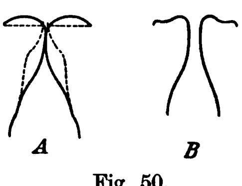


Fig. 50.

Ein Blick auf die Zeichnung A belehrt uns ohne weiteres, daß ein „Auf- und Abwärts"-schwingen der Stimmlippen im Sinne Oertels (a.a.O.S.11) dem leider auch Réthi (a.a.O. S. 3) nicht widersprochen hat, durchaus nicht statthaben kann. Vielmehr trifft die Merkelsche Behauptung zu (a.a.O.S. 95), daß die Stimmlippen nach „auf- und auswärts"schwingen, die wir nur dahin einzuschränken haben, daß die Auswärtsbewegung die wesentliche und die Aufwärtsbewegung gewissermaßen eine sekundäre ist. Das ergibt die Richtung der Kraftlinien der im unteren Kehlkopfraum unter Druck stehenden Ausatmungsluft. Wenn man durch die ausgeschweiften Durchschnittslinien der unteren Stimmlippenflächen der Fig. 51 je eine ausgleichende gerade Linie F und F′ zieht, so zeigt sich, daß diese Linien von den Kraftlinien a c des von unten senkrecht aufsteigenden Luftstromes unter einem sehr spitzen Winkel getroffen werden.

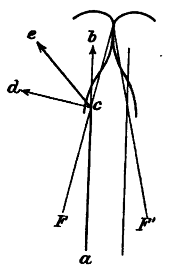


Fig. 51.

Die Kraftlinie ac teilt sich im Angriffspunkte c an den schrägen unteren Stimmlippenflächen in zwei Komponenten: eine zur letzteren senkrecht gerichteten c d und einer vertikalen c b. Die Folge davon ist, daß die resultierende Kraftlinie e c nur wenig in der Richtung nach oben und wesentlich als Seitendruck auf die unteren Stimmlippenflächen im Sinne des Pfeiles c e verläuft. Die unter Druck stehende Ausatmungsluft sprengt somit gewissermaßen wie ein Keil die aneinandergepreßten Stimmlippen auseinander. Da aber die von den Linien F und F′ markierten Flächen weichen Körpern angehören, so werden bei dem Vordringen des unterstellten Luftkeils die inneren Ränder der Stimm-

lippen zwar wesentlich seitwärts gedrängt, aber gleichzeitig quellen durch diese Pressung die Randteile der Stimmlippen etwas nach oben hervor, so daß sie, wie in dem stroboskopischen Bilde Taf. VI 18 als schmale strangförmige Erhebungen erscheinen und etwa den in Fig. 50 B dargestellten Durchschnitt zeigen. Beim Zurückschwingen schlagen die Stimmlippen aufeinander und verlieren ihre lebendige Kraft: „sie schlagen sich“ wie die auf den Rahmen aufschlagenden Zungen „tot“ und verharren ähnlich wie diese in ihrer Gegenschlagstellung, bis sie durch den im unteren Kehlkopfraum inzwischen wieder angewachsenen Luftdruck von neuem auseinandergesprengt werden. Sie schwingen demnach von ihrer Ruhelage nach auswärts und zurück. Durch diesen Wechsel von längerem völligen Glottis-Schluß und kürzerer Glottis-Öffnung erfährt der Strom der Ausatmungsluft entsprechend lange vollkommene Unterbrechungen und versetzt mit kurzen periodischen Stößen die über den Stimmlippen befindliche Luft in die tongebenden Schwingungen, gleichzeitig aber gerät auch die unter Druck befindliche Luft unterhalb der Stimmlippen in Vibrationen, die sich besonders bei tiefen und lauten Tönen dem Brustkasten mitteilen und deshalb den Brusttönen ihren Namen gegeben haben. Diese Erschütterungen kommen dadurch zustande, daß der Strom der Ausatmungsluft, während er durch die geöffnete Glottis schnell entweicht, durch den plötzlichen Schluß derselben an seiner Vorwärtsbewegung ebenso plötzlich verhindert wird und somit einen Rückstoß erhält, der sich der hinter ihm befindlichen Luft und durch diese der Brustwand mitteilt. Daß dieser Rückstoß lediglich auf den periodisch wiederkehrenden völligen Glottis-Schluß zurückzuführen ist, beweist das Fehlen desselben bei den Tönen des Falsettregisters, wo der Luftstrom niemals ganz unterbrochen wird, weil die Glottis dauernd offen bleibt und während der Schwingungen nur „erweitert“ und „verengert“ wird. Diese letztere Tatsache ist als solche durch die bereits erwähnten Bilder erwiesen und bildet mit den anderen bemerkenswerten Erscheinungen, welche die Photographieen bieten, wichtige Anhaltspunkte zur Aufklärung des Schwingungstypus der Stimmlippen im Falsettregister.

Bei Falsettönen erscheinen zunächst die Stimmlippen nicht nur flacher als im Brustregister, sondern ihre Oberflächen lassen teilweise (Taf. I 2 und IV.) auch Details in Form von ge-

schlängelten Gefäßen erkennen, als Hinweis darauf, daß im Falsettregister die Stimmlippen in ihrer Breite weniger erschüttert werden. Dagegen sind die Stimmlippenränder undeutlicher und verwaschen, was dafür spricht, daß die Schwingungen wesentlich auf die schmalen Randzonen der Stimmlippen beschränkt sind. Diese Annahme findet ferner eine große Stütze in der Schleimverteilung auf den Stimmlippen der Bilder Taf. II 4 und VI 16. Die schmal verwaschenen Stimmlippenränder sind nach außen von je einer schwach bogenförmig verlaufenden und infolge des Lichtreflexes weiß erscheinenden Schleimlinie begrenzt. Ganz besonders charakteristisch und scharf sind diese Linien auf Taf. VI 16 zur Darstellung gekommen. Diese Linien halte ich für die Grenze zwischen der schmalen, stark schwingenden Randpartie und der nur in geringeren Erschütterungen befindlichen übrigen Breite der Stimmlippenoberfläche. Auf diese letztere wird allmählich der „Randschleim“ abgeschüttelt, wie die linken Stimmlippe Taf. VI 16 zufällig zu gleicher Zeit zeigt, um schließlich sich in einer zweiten gebogenen Linie am Eingang zum Ventric. Morgagni anzusammeln, die auf der rechten Stimmlippe desselben Bildes sichtbar ist. Dieser Schleimtransport nach der Insertionsstelle der Stimmlippen wird dadurch erleichtert, daß (Merkel, l. c. S. 107) im Falsettregister die Stimmlippen dem von unten kommenden Luftdruck nachgeben und von ihm etwas aufgetrieben werden, so daß ihre Oberflächen nach außen hin etwas schräg abfallen. Die stroboskopisch hergestellte Photographie der Stimmlippen in ihrer größten Entfernung voneinander während eines Falsettones (c′), Taf. VI 19, zeigt diese von Merkel bemerkte Stellung. Außerdem aber ist auf diesem leider etwas schwachen Bilde der Befund an den Stimmlippenrändern sehr bemerkenswert. Besonders in der etwas helleren hinteren Hälfte der Stimmlippen sieht man die Ränder in der Form schmaler Streifen nach aufwärts gerichtet. Auf der linken Stimmlippe ist dieser Streifen zu meiner Freude sogar von einer kurzen Schleimlinie begrenzt, einem Fragment der in Fig. 16 derselben Tafel so deutlichen Grenzlinie der schwingenden Randpartie der Stimmlippen. Wenn wir aber die Entfernung des Schleimstreifens von dem dunklen, die Glottisöffnung markierenden Schatten auf beiden Bildern vergleichen, so ist dieselbe zweifellos breiter auf Nr. 16. Ich schließe daraus, daß der im Falsettregister durch die äußere Spannung

dünn oder schärfer ausgezogene Stimmlippenrand auf Taf. VI 19 in der Schwingung nach oben begriffen ist und dadurch die strangförmige „schmale“ Erhebung einwärts von der Schleimlinie verursacht. In Fig. 52 B a habe ich diesen Vorgang zur Anschauung gebracht. Befindet sich aber der scharfe Stimmlippenrand in der Schwingung nach oben, so muß auch die Möglichkeit seiner Bewegung nach unten zugegeben werden, zumal die offene Glottis es gestattet, daß beide Stimmlippenränder aneinander vorbeischwingen können. Voraussichtlich werden dabei die Stimmlippenränder nur wenig nach unten über ihre Ruhelage hinaus schwingen, weil sie in dieser Richtung den Druck der Ausatmungsluft zu überwinden haben. Die Annahme dieser Schwingungsart hält Nagel[1]) für bedenklich, weil die Stimmlippen bei einer „bandartigen Verdünnung“ ihrer Randpartieen im Falsett als „reguläre Membranzungen“ in etwas gegeneinander geneigter Stellung durchschlagend von oben nach unten schwingen müßten, „Membranpfeifen“ aber der angenommenen Art beim Anblasen nicht schwingen und tönen. Ich bin der Ansicht, daß es nicht angängig ist, Beobachtungen die an Membranen gemacht sind, als Beweise gegen die Deutung der Vorgänge bei den schwingenden Stimmlippen anzuführen. Die letzteren sind keine Membranen und gleichen denselben auch im Falsettregister nicht, wo sie, wie die bereits erwähnten Wachsabgüsse zeigen, ebenfalls eine dreieckig prismatische Form haben, und zwar ohne „bandartige Verdünnung“. Nagel fällt hier in denselben Irrtum wie Oertel bei der Deutung seiner stroboskopischen Untersuchungen. Sicher hat Oertel dabei alle Bewegungen gesehen, die auch Koschlakoff, Réthi und ich beobachtet haben; aber von seiner Membran-Theorie befangen deutet er die Schwingungen außerhalb der angeblichen Knotenlinie als Auf- und Abwärtsbewegungen mit größter Bewegung in der Mitte wie bei seinen Membranen. Abgesehen davon, daß der dreiseitig-prismatische Durchschnitt der Stimmlippen an dieser Stelle ein solches Schwingen unmöglich macht, hat

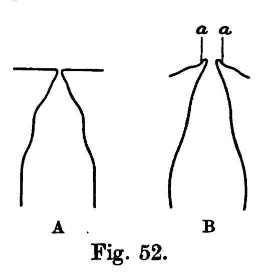


Fig. 52.

[1]) W. Nagel, Physiologie der Stimmwerkzeuge. Handbuch der Physiol. des Menschen, Bd. IV, S. 742.

Réthi (l. c. S. 7) sehr zutreffend die Oertel'sche Behauptung damit zurückgewiesen, daß eine Auf- und Abwärtsbewegung der Stimmlippen an dieser Stelle bei dem fast senkrechten Blick von oben nicht gesehen werden könne. Ich kann darin Réthi nur beistimmen, ebenso wie ich seine Beobachtungen mit einer allerdings etwas modifizierten Deutung durchaus bestätigen kann. Auch ich habe stroboskopisch keine „Knotenlinie" feststellen können. Die von den Schleimlinien bezeichnete Stelle hat sich immer als die Grenze der schwingenden Randpartie erwiesen, was damit zu erklären ist, daß der Schleim von dem stark bewegten Stimmlippenrande auf die weniger erschütterte Nachbarschaft abgeschüttelt wird und dort zunächst liegen bleibt, bis ihn die schwächeren Erschütterungen allmählich nach den Morgagnischen Taschen hintransportieren. Die übrige Oberfläche sah ich während der Randschwingungen sich in zitternde Längsfältchen legen, welche ich als Folge einer Erschütterung der den Stimmlippen sehr locker aufliegenden Schleimhaut gedeutet habe. Jedenfalls aber ist die Erschütterung der Oberfläche sekundär, d. h. erst durch die Schwingungen des Stimmlippenrandes hervorgebracht, und steht mit der Tonerzeugung in keinem ursächlichen Zusammenhang. Die von Réthi gesehene Kante dürfte dem in der Schwingung nach aufwärts begriffenen Stimmlippenrande entsprechen, wie in der Fig. 52 angedeutet ist.

Vierzehntes Kapitel.

Folgerungen aus den photographischen und stroboskopischen Beobachtungen — Die Stimmlippen sind Zungen in physikalischem Sinne — Widerlegung des Vergleichs mit Flötenpfeifen — Übergang der Töne aus dem Brustregister in das Falsettregister durch Änderung des Spannungs-Mechanismus der Stimmlippen — „Mittelstimme" — „Deckung" der Töne — Untersuchungen über „offen" und „gedeckt" gesungene Vokale von W. Pielke — Einfluß der Schwingungsform der Stimmlippen auf die Klangfarbe.

Das für das Falsettregister charakteristische Offenbleiben der Glottis habe ich bis zu den höchsten Tönen beobachten können. Dabei zeigte sich aber immer die bereits von Merkel (l. c. S. 107) gesehene Veränderung. Die Glottisspalte wird bei aufsteigender Skala kürzer und rückt in die vordere Hälfte der Stimmlippen,

während die hintere Hälfte derselben fest aneinander gepreßt und bei den Schwingungen unbeteiligt ist. Der partielle feste Schluß der phonischen Glottis muß außer den die Gießbeckenknorpel fest aneinanderdrückenden Muskeln (M. aryt. transvers. u. M. crico-aryt. later.) auf eine bei den hohen Falsettönen wiedereinsetzende, aber sich nur in der hinteren Hälfte der Glottis vollziehende Kontraktion der Musc. vocales zurückgeführt werden. Diese Annahme ist umso berechtigter, als der bereits erwähnte schräge Verlauf der Muskelfasern besonders in den hinteren Partien des Stimmuskels die partielle Beteiligung des letzteren durchaus möglich erscheinen läßt. Dagegen habe ich mich von einer Dämpfung der Stimmlippen durch Auflegen der Taschenbänder auf die letzteren, wie sie von Mandl und anderen Autoren immer noch angenommen wird, nicht überzeugen können. Überdies ist ja eine Dämpfung der Stimmlippen für die Falsettöne auch nicht notwendig, da doch allgemein anerkannt ist, daß im Falsettregister nur die Ränder der Stimmlippen schwingen und die schwingende Randzone mit zunehmender Tonhöhe lediglich infolge der äußeren Spannung schmäler wird, ohne daß gleichzeitig die Taschenbänder in demselben Grade sich der Medianlinie nähern. Eine starke Annäherung der Taschenbänder konnte ich nur bei dem bereits erwähnten Fistelsänger beobachten, als ihm ein für ihn sehr hoher Falsetton mißglückte und in einen Preßton umschlug. Das geschah, während ich seinen Kehlkopf photographierte, so daß der Vorgang in dem Bilde Taf. V. 10 festgehalten wurde. Sehr bemerkenswert ist hier wieder die starke Dehnung der Stimmlippen. Die Glottis erscheint etwas verwischt, da das Bild nicht stroboskopisch aufgenommen ist.

Wenn aber bei den Falsettönen die Glottis stroboskopisch als Spalt erscheint und die Schwingungen der Stimmlippen nur auf eine schmale Randzone beschränkt sind, so sollte doch dieser Befund zur Erklärung der Stimmlippen-Schwingungen durchaus genügen. Bleibt die Glottis während der Schwingungen offen, so können selbstverständlich die Stimmlippen beim Rückschwung nicht gegeneinanderschlagen, d. h. sich berühren. Es bleiben nur zwei Möglichkeiten: entweder die Stimmlippen-Ränder schwingen „durchschlagend", was bei der starken äußeren Spannung nur in einer mit der Tonhöhe immer kleineren Amplitude geschehen kann, oder: die Stimmlippen-Ränder schwingen wesentlich „seitwärts"

in dem Sinne, wie die von Ewald[1]) konstruierten „Polsterpfeifen" und ähnlich wie die ganzen Stimmlippen sich bei den Brusttönen wesentlich „seitwärts" bewegen. Ich bin überzeugt, daß beide Bewegungen ausgeführt werden, und zwar wird die „durchschlagende" Schwingung überwiegend dann eintreten, wenn der Stimmlippenrand bei seiner äußeren Spannung und Dehnung sehr scharf ausgezogen ist. Das hängt aber von anatomischen Eigenschaften der „Chorda vocalis" ab und wird zweifellos individuell verschieden sein. Diese Schwingungsart ist jedoch nicht der springende Punkt für die Charakterisierung der Stimmlippen im Falsettregister. Der Charakter — die Klangfarbe des letzteren ist lediglich bestimmt durch die erwiesene Tatsache, daß die Glottis infolge der größeren äußeren Spannung während der Schwingungen offen bleibt. Die Schwierigkeit, den hierbei stattfindenden Schwingungstypus der Stimmlippenränder stroboskopisch festzustellen, veranlaßt Katzenstein[2]) dazu, mit Nagel[3]) den Zungenmechanismus der Stimmlippen für das Falsettregister in Frage zu stellen. Wie bereits eingangs erwähnt ist, hat Nagel die Möglichkeit ausgesprochen, „daß der Kehlkopf im Falsett zunächst als Lippenpfeife angeblasen würde und die verdünnten gespannten Stimmlippenränder nur gewissermaßen passiv zum Mitschwingen kämen". Eine solche Annahme ist aber aus verschiedenen Gründen durchaus unberechtigt. Zur Erzeugung eines Flötentones (Lippenpfeife) gehört doch vor allem ein genügend weiter Kernspalt, um reichliche Luft an eine gegenüberliegende Kante streichen zu lassen. Nehmen wir nun an, daß der gerade bei den höheren und höchsten Falsettönen immer schmälere und kürzere Glottisspalt dem Kernspalt entsprechen sollte, so steigt doch, da die Unterflächen der Stimmlippen symmetrisch gegeneinander geneigt sind, das schmale Luftblättchen aus dem Spalt senkrecht in die Höhe zwischen den noch relativ weit auseinanderstehenden Taschenbändern hindurch, ohne sie zu treffen. Andererseits aber können bekanntlich gerade hohe Falsettöne im Gegensatz zu den

---

[1]) Ewald, Handbuch der Laryngologie u. Rhinol. v. Heymann, 1. Bd.

[2]) Katzenstein, Über Probleme und Fortschritte in der Erkenntnis der Vorgänge bei der menschl. Lautgebung usw. Beiträge usw. A. Passow u. K. L. Schaefer, 1909, Bd. III.

[3]) Nagel, Über Problematisches in der Physiologie der Stimmlippen. Zentralblatt f. Physiologie 1907, Nr. 23.

niederen, bei denen durch den weiteren Glottisspalt eine „Luftverschwendung“ eintritt, sehr lange ausgehalten werden, weil hier aus der engen und kurzen Stimmritze nur sehr wenig Luft entweicht. Von den Flötenpfeifen aber wissen wir, daß bei derselben Pfeife gerade die höheren Töne erheblich mehr Luft brauchen als die tieferen (s. Kap. II). Es ist daher auch unmöglich, daß der dünne aus der engen Glottis aufsteigende Luftstrahl genügt, um durch „Brandung“ (Tyndall) an einer Kante, die hier doch in den abgerundeten Rändern der Taschenbänder zu suchen wäre, tonerregende Impulse zu erzeugen. Ferner aber sprechen auch die für das Ansatzrohr der Flötenpfeifen geltenden Gesetze dagegen. Bei den Flöten- oder Lippenpfeifen muß jedes Ansatzrohr die für seinen Ton nötige mathematisch bestimmte Länge oder bei den kubischen Pfeifen einen ebenso genau bemessenen Rauminhalt haben. Das menschliche Ansatzrohr müßte demnach, um die verschiedenen Flötentöne des Falsetts zu erzeugen, seine Länge und seinen Rauminhalt in ausgedehntem Maße variieren. Das ist aber nicht der Fall. Nur die Mundhöhle läßt sich für die Vokale verändern und für die mit dem Munde erzeugten Pfeiftöne, wo der Luftraum durch Heben der vorderen Zungenteile an den harten Gaumen für die einzelnen Töne bemessen wird[1]). Bei den gesungenen Tönen kommt aber das menschliche Ansatzrohr als Ganzes in Betracht und ist als solches wenig veränderlich. Außerdem ist dasselbe wegen der Nachgiebigkeit seiner Wände außerstande, stehende Schwingungen seiner Luftmasse unter Bildung von Knotenpunkten oder Knotenflächen entstehen zu lassen, wie das in den Flötenpfeifen immer der Fall ist. Hier ist die Starrheit der Wände Grundbedingung für die Bildung der Knoten beziehungsweise zur Entstehung des Tones (Savart)[2]). Wenn der Orgelbauer die Wände des Körpers einer offenen Pfeife zu dünn macht, dann entsteht kein Ton, weil der Widerstand der Wandung in der Mitte der Pfeife zu gering ist, um hier die für die Knotenbildung notwendige Verdichtung der Luftmasse aufkommen zu lassen. Erst wenn er diese Stelle mit der Hand preßt oder durch ein aufgelegtes Brettchen verstärkt, spricht die Pfeife an, zum Zeichen, daß nunmehr die Bildung der Knotenfläche zustande gekommen

[1]) Grützner, l. c. S. 134.
[2]) Auerbach, Akustik, S. 429.

ist[1]). Andererseits aber sind die Schwingungsverhältnisse im menschlichen Ansatzrohr durchaus mit denen im Schallkörper der Zungenpfeifen zu vergleichen. Bei der Besprechung der Zungenpfeifen wurde gesagt, daß die Zungenpfeifen sich verhalten wie umgekehrt gedackte Flötenpfeifen, d. h. während in der gedackten Pfeife die Knotenfläche sich am geschlossenen Ende befindet und der Pfeifenmechanismus am offenen, also dort, wo die größte Bewegung der Luftteilchen (Mitte des Schwingungsbauches) vor sich geht, ist bei den Zungenpfeifen umgekehrt der Zungen-Mechanismus gewißermaßen am gedackten Ende eingelassen. Hier findet dicht über dem Mechanismus der größte Wechsel der Dichtigkeit statt, und am freien Ende die größte Bewegung der Luftteilchen. Daß dem so ist, davon kann man sich wieder durch meine Auskultationsmethode überzeugen. Führt man einen Hörschlauch in das Ansatzrohr einer Zungenpfeife ein, so hört man den Ton am lautesten dicht über der Zunge, weil hier der größte Wechsel von Verdichtung und Verdünnung stattfindet[2]). Ebenso ist auch der menschliche Stimmton im Brust- wie Falsettregister dicht über den Stimmlippen am lautesten hörbar, was ich mit einer gekrümmten in den Kehlkopf eingeführten Röhre leicht abhören konnte. Würde dagegen das menschliche Ansatzrohr als Lippenpfeife angeblasen, so müßte bei der Auskultation der Ton wie bei den Flötenpfeifen dicht über dem Mechanismus weniger laut gehört werden, als an den anderen, den Knoten entsprechenden oder ihnen naheliegenden Stellen. Dieselben Gründe sprechen zum Teil auch gegen die Annahme, daß der Kehlkopf im Falsettregister wie eine Savartsche[3]) Pfeife angeblasen werde. Diese besteht aus einem runden Kästchen, dessen obere und untere Fläche in der Mitte je ein rundes Loch hat (Fig. 53). Wenn man quer durch das Kästchen bläst, von a nach b, so entsteht bald Luftverdünnung im Kästchen, welche ein Einströmen von Luft bei b zur Folge hat. Der Wechsel von Verdünnung mit Verdichtung erzeugt den Ton. Im Kehlkopf

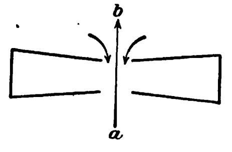


Fig. 53.

[1]) Töpfer, l. c.
[2]) Auerbach, Akustik, S. 429.
[3]) Grützner, l. c. S. 134.

kämen für diesen Vergleich die Morgagnischen Taschen als Hohlraum, die Glottis als Eingangsöffnung, der viel breitere Spalt zwischen den Taschenbändern als Ausgangsöffnung in Betracht. Bereits J. Müller[1]) hat nachgewiesen, daß die Ventriculi Morgagni für die Tonerzeugung keine Bedeutung haben, sondern lediglich die freie Bewegung der Stimmlippen sichern sollen. Außerdem sind aber gerade bei den hohen Falsettönen die Eingänge zu diesen Taschen infolge der gleichzeitigen Längsspannung der Taschenbänder mit den Stimmlippen zu engen Spalten verengt oder ganz verstrichen[2]), so daß die Taschen selbst als Lufträume nicht fungieren können.

Es bleibt demnach nur übrig, festzuhalten, daß, wie im Brustregister, auch im Falsettregister die Töne durch die Schwingungen der Stimmlippen im Sinne Garcias verursacht werden. Die zur Tonerzeugung notwendigen Luftstöße werden im Brustregister durch abwechselnde „Öffnung“ und „vollkommenen Schluß“, im Falsettregister aber nur durch „Öffnung“ und „Verengerung“ der Glottis bewirkt. Bei den Falsettönen bleibt also die Glottis immer mehr oder weniger offen, daher hier der weichere Ton und mit diesem ein im allgmeinen größerer Luftverbrauch, als im Brustregister. In beiden Registern verhalten sich die Stimmlippen „funktionell“ wie Zungen im weiteren physikalischen Sinne und besonders wie die Mundlippen des Trompetenbläsers. Ich[3]) konnte stroboskopisch nachweisen, daß beim sogenannten stoßenden Ton der Trompeten die Mundlippen sich fest aneinanderlegten, also die Lippenspalte schlossen wie die Stimmlippen im Brustregister. Beim weichen, „hauchenden“ Trompetenton trat dagegen kein völliger Lippenschluß ein, auch bei größter Annäherung der Mundlippen gegeneinander blieb immer ein leicht spindelförmiger Spalt zwischen ihnen bestehen, wie im Falsettregister. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Stimmlippen und den Mundlippen des Trompetenbläsers besteht jedoch darin, daß die ersteren einen in sehr feinen Abstufungen regulierbaren Spannungsmechanismus haben, dessen Arbeit durch zwei Kräfte geleistet wird. Die eine entspricht den Musc. thyreo-arytaenoidei, den Stimm-Muskeln, die andere

---

[1]) J. Müller, l. c. S. 205.

[2]) Grützner, S. 96.

[3]) Musehold, Stellung d. Stimml. im Brust- u. Falsettregister. Archiv f. Laryngol. 1898.

den äußeren Spannungsmuskeln der Stimmlippen, den Musc. crico-thyreoidei. Überwiegt die Tätigkeit der beiden Stimm-Muskeln, so werden die Töne des Brustregisters erzeugt, durch Übermacht der äußeren Spannungsmuskeln entstehen die Falsetttöne. Es tritt demnach bei den beiden Registern ein Wechsel der Kraftverteilung im Spannungsmechanismus ein. Dem Sänger liegt deshalb die Aufgabe ob, diesen Wechsel sich so vollziehen zu lassen, daß der musikalisch-ästhetische Eindruck der Töne nicht gestört wird.

Den einen Weg zur Erfüllung dieser Aufgabe bildet der bereits erwähnte Mechanismus der Mittelstimme, wo die für das Brustregister charakteristische Kontraktion der Musc. thyreo-arytaenoidei schon relativ weit von der Grenze des Registers „ganz allmählich" abnimmt und durch die ebenso allmählich zunehmende Tätigkeit der äußeren Spannungsmuskeln, der Musc. crico-thyreoidei, ersetzt wird. Die Ausdehnung dieser Mittelstimme ist bei den einzelnen Stimmlagen verschieden, wie aus Fig. 37 deutlich zu ersehen ist.

Das andere Mittel, den Übergang vom Brust- zum Falsettregister möglichst unbemerkt auszuführen, bietet die besonders von der Männerstimme, wenig vom Alt und am wenigsten von der höheren Frauenstimme geübte „Deckung" der Töne. Wenn z. B. Brusttöne auf Vokal a mit kräftiger Stimme aufwärts gesungen werden, so erhalten sie mit zunehmender Höhe einen immer grelleren Klang, um schließlich an einer individuell verschiedenen Grenze einen häßlichen schreienden Charakter anzunehmen. Will der Sänger nun einen noch höheren Ton hervorbringen, so muß er aus dem Brustregister in das Falsettregister übergehen. Man hat dieser Schwelle in der Tonreihe des Brustregisters die Bezeichnung „Stimmbruch" gegeben — nicht zu verwechseln mit Stimmwechsel (Mutation) (Pielke)[1]. Der geschulte Sänger versteht es, diesen Stimmbruch zu vermeiden, indem er durch eine kaum merkliche Veränderung des Vokalklanges, durch eine dunklere Färbung desselben, die sogenannte „Deckung", die Stimme ausgleicht. Man spricht demgemäß von „offenen" und „gedeckten" Tönen. Diese Ausdrücke haben aber nichts gemein mit

[1]) W. Pielke. Über „offen" und „gedeckt" gesungene Vokale. Beiträge usw. von A. Passow u. K. L. Schaefer. Bd. V, 1911.

den gleichlautenden Bezeichnungen der Flötenpfeifen. Pielke hat den bei der Deckung tätigen Mechanismus eingehend untersucht und von den „offenen“ und „gedeckten“ Tönen Klangkurven aufnehmen lassen, die Gutzmann[1]) analysiert und beschrieben hat. Die Untersuchungen von Pielke, deren Ergebnisse ich duch Beobachtungen an seinem eigenen Kehlkopf durchaus bestätigen kann, zeigten zunächst, daß bei „offenen“ Tönen der Eingang des Kehlkopfs verkleinert und bei den „gedeckten“ erweitert war. Das Bild auf Taf. V. 9 entspricht ungefähr der Gestalt des Kehlkopfeingangs bei einem lauten „offenen“ Ton (c′). Diese Verschiedenheit des Kehlkopfeingangs ist hauptsächlich durch die Stellung des Kehldeckels bedingt. Während derselbe beim offenen Ton nach hinten überliegt und somit den vorderen Teil der Stimmlippen verdeckt, richtet er sich bei „gedeckter“ Tongebung auf, so daß die Stimmlippen in ihrer ganzen Länge zu übersehen sind. Letzteres ist um so leichter möglich, als während der „Deckung“ gleichzeitig die Gießbecken-Knorpel sich etwas nach hintenüber legen. Beim „offenen“ Singen dagegen sind die Gießbeckenknorpel nach vorn übergekippt und die Taschenbänder etwas gegen die Mitte gedrängt, so daß die Stimmlippen auch schmaler erscheinen, als bei der Deckung der Töne. Das vor allem auffallende Verhalten des Kehldeckels legt die Annahme nahe, daß seine Stellung die bei der Deckung eintretende Änderung der Klangfarbe bewirke, zumal sich schon Garcia[2]) ähnlich geäußert hat. Nach seiner Ansicht „spielt bei der Eigenschaft der Stimme die Epiglottis auch eine wichtige Rolle, da jedesmal, wenn sie sich senkt und beinahe den Eingang schließt, die Stimme an Glanz gewinnt und im Gegenteile, wenn dieselbe hinaufgezogen ist, sofort verschleiert wird“. Diese Beobachtung Garcias wird durch die Untersuchungen Pielkes und die von Gutzmann ausgeführte Analyse der von „offenen“ und „gedeckten“ Tönen aufgenommenen Klangkurven durchaus bestätigt. Die offen gesungenen Vokale — also bei gesenktem Kehldeckel —, bei denen die Oktave stark hervortritt, haben den Klangcharakter des Schmetternden, während die

---

[1]) Gutzmann, Bemerkungen zu dem vorstehenden Aufsatze von W. Pielke. Beiträge usw. von A. Passow u. K. L. Schaefer. Bd. V, 1911.

[2]) Garcia, l. c.

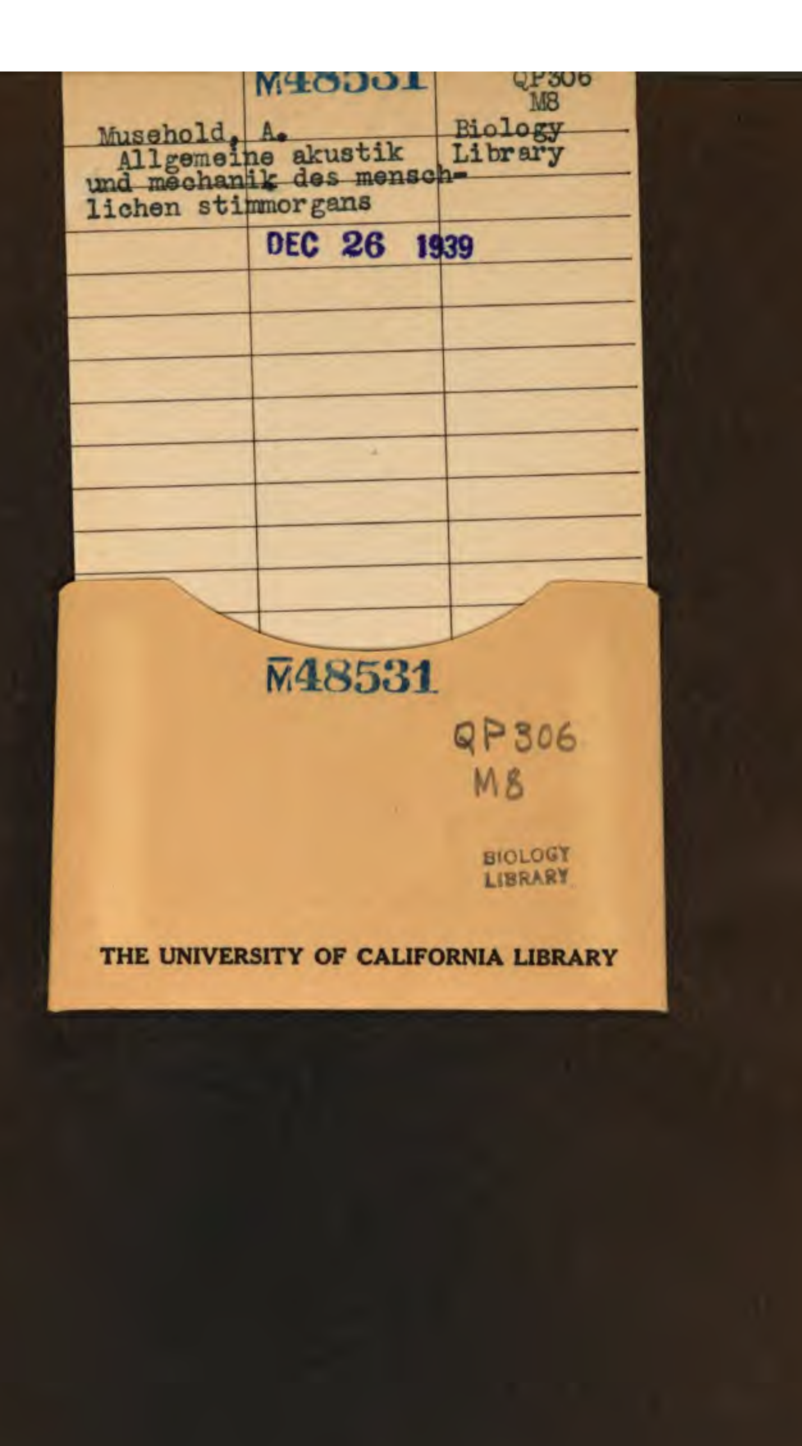
„gedeckten“ — bei erhobener Epiglottis —, in denen sich der Grundton besonders stark bemerkbar macht, einen milderen, gedämpften Klang geben.

Die Verschiedenheit der Klangfarbe der „offenen“ und „gedeckten“ Töne ist demnach nicht nur durch das Gehör, sondern auch durch die Klanganalyse erwiesen. Gleichwohl ist es doch fraglich, ob dieser Unterschied lediglich durch die beobachteten Veränderungen in der Stellung des Kehldeckels, der Gießbeckenknorpel und Taschenbänder begründet ist. Pielke gibt gleichzeitig als geschulter und erfahrener Sänger an, daß der Singende bei den offenen Tönen, trotz der starken Kraftentfaltung „das Gefühl des Ausruhens hat“, während der Gesang gedeckter Töne ermüdend ist. Man kann deshalb mit vollem Recht annehmen, daß bei der Deckung der Töne gewisse Muskeln in ungewöhnlich hohem Grade in Tätigkeit sind. Pielke neigt mit allem Vorbehalt zu der Ansicht, „daß bei den gedeckten Tönen eine gradweise Verschiebung eines Anteils der Muskeltätigkeit des Musc. thyreoarytaenoideus zu Lasten des M. crico-thyreoideus stattfindet“. Ich schließe mich nach den Beobachtungen, die ich an seinem Kehlkopf gemacht habe, dieser Meinung durchaus an. Doch möchte ich den Ausdruck „gradweise“ nicht in dem Sinne von allmählich aufgefaßt wissen, denn die beim Übergang vom offenen Ton zum gedeckten im Kehlkopf sichtbaren Veränderungen zeigen sich plötzlich, sprungartig, so daß es außerordentlicher Aufmerksamkeit bedarf, um sie zu verfolgen. Dementsprechend nehme ich an, daß die vermehrte Tätigkeit der Musc. crico-thyreoidei noch während der für das Brustregister charakteristischen Funktion der Musc. thyreo-arytaenoidei relativ kräftig und plötzlich einsetzt. Dafür spricht auch die Beobachtung Pielkes, daß beim Übergang zur gedeckten Stimme sich gewöhnlich auch ein kleiner Ruck des Schildknorpels in der Richtung nach unten bemerkbar macht. So könnte die Bewegung der Epiglottis und der Gießbeckenknorpel vielleicht auch nur als eine Mitbewegung infolge des plötzlichen verstärkten Einsetzens der äußeren Spannmuskeln aufgefaßt werden. — Demgemäß würde die verschiedene Klangfarbe der „offenen“ und „gedeckten“ Töne auf eine Änderung des Schwingungstypus der Stimmlippen zurückzuführen sein. Wir haben ja aus den stroboskopischen Untersuchungen erfahren, daß bei einem kräftigen Brustton die Phase des Glottis-

schlusses länger dauert, als die der Glottisöffnung. Es ist sehr wahrscheinlich, daß beim „gedeckten" Ton unter Nachlaß der Kontraktion der Musc. thyreo-arytaenoidei und bei zunehmender Beteiligung der Musc. crico-thyr. sich die Dauer der genannten Phasen verschiebt oder ausgleicht. Dann können durch die Stimmlippen-Schwingungen nicht mehr so plötzliche kurze Luftstöße erzeugt werden wie beim kräftigen — offenen — Brustton, dessen Klangfarbe ja deshalb durch hohe Obertöne charakterisiert ist, sondern die Luftstöße erfolgen in allmählich sich vollziehenden Unterbrechungen und bewirken den weicheren „gedeckten" Ton. Ich habe die Stimmlippen des Herrn Kollegen Pielke während der offenen und gedeckten Tongebung auch stroboskopisch untersucht, aber zunächst nur feststellen können, daß auch bei den „gedeckten" Brusttönen die für das Brustregister charakteristische Form der Glottis: ihre durch die Stimmlippen-Schwingungen abwechselnde „Öffnung" und „Schließung" gewahrt bleibt. Weiteren eingehenden Untersuchungen, die sich möglichst auch auf die relative Dauer der Schwingungsphasen bei „offen" und „gedeckt" gesungenen Tönen zu erstrecken haben, wird es vorbehalten sein, auch hier die aus dem Wechsel der Spannungsmechanik zu erschließende Verschiedenheit der Schwingungen nachzuweisen. Damit wäre ein weiterer wertvoller Beweis gegeben für die bereits durch den Mechanismus der Stimmlippen im Brust-und Falsettregister erwiesene Tatsache, daß die Klangfarbe der menschlichen Stimme, ähnlich wie bei den Zungenpfeifen der Orgel, nicht allein von der Beschaffenheit des Ansatzrohres, sondern auch wesentlich von dem Schwingungstypus der Stimmlippen abhängt. Während aber die Untersuchung des Spannungs- und Schwingungs-Verhältnisse der Stimmlippen im Brust- und Falsettregister durch den in die Augen fallenden Unterschied der Glottisform erleichtert war, ist die Erforschung der Beziehungen zwischen der Spannung der Stimmlippen und den Klangfarken der „offenen" und „gedeckten" Töne erheblich schwieriger. Hierzu bedarf es eines weiteren Ausbaues unserer Untersuchungsmethoden und der Schärfung unseres Blickes für die feineren Vorgänge bei den Schwingungen der Stimmlippen durch ausgedehnte Übung in der Stroboskopie.

Erklärungen zu den photographischen Tafeln.

Die numerierten kleinen Photographien sind die Originalaufnahmen in etwa $^4/_5$ der natürlichen Größe des Kehlkopfs. Die links daneben stehenden stellen etwa 4—5 malige Vergrößerungen derselben dar.



M48531
QP306
M8
Musehold, A.
Biology
Allgemeine akustik
Library
und mechanik des menschlichen stimmorgans
DEC 26 1939
M48531
QP306
M8
BIOLOGY
LIBRARY
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY



